М.МИННАРТ

# СВЕТ И ЦВЕТ В ПРИРОДЕ

ПЕРЕВОД ПОД РЕДАКЦИЕЙ

Г.А.ЛЕЙКИНА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1969

М 62
522.1 + 535
522.0 + 535.3

# DE NATUURKUNDE VAN'T VRIJE VELD

Door

Dr. M. MINNAERT

Hoogleraar aan de Rijksuniversiteit te Utrecht

VIERDE DRUK

## LICHT EN KLEUR IN HET LANDSCHAP

ZUTPHEN — W. J. THIEME & CIE — MCMXLIX

*Миннарт М.*

Свет и цвет в природе

М., 1969 г., 360 стр. с илл.

Редактор *Г. С. Куликов*

Техн. редактор *В. Н. Крючкова* Корректор *И. Б. Мамулова*

Сдано в набор 26/XI 1968 г. Подписано к печати 28/III 1969 г. Бумага 60×90¹/₁₆.
Физ. печ. л. 22,5. Условн. печ. л. 22,5. Уч.-изд. л. 22,22. Тираж 40 000 экз.
Цена книги 1 р. 32 к. Заказ № 3341.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Москва, Ж-54, Валовая, 28.

# ОГЛАВЛЕНИЕ


От издательства . . . . . 8

От автора . . . . . 9

Предисловие редактора перевода . . . . . 10

Предисловие . . . . . 13

**Солнечный свет и тени** . . . . . 17

1. Изображение Солнца (17). 2. Тени (19). 3. Изображение Солнца и тени во время солнечных затмений и заката (20). 4. Двойные тени (21).

**Отражение света** . . . . . 23

5. Закон отражения (23). 6. Отражение от проводов (23). 7. Различие между предметом и его отражением (25). 8. Лучи света, отраженные в каналах и реках (27). 9. Необычные отражения (28). 10. Стрельба по отражениям (29). 11. Гелиотроп Гаусса (30). 12. Отражение в садовом зеркальном шаре (31). 13. Отражение в мыльных пузырях (32). 14. Неправильности на поверхности воды (33). 15. Оконное и зеркальное стекла (34). 16. Дорожное зеркало (35). 17. Неправильное отражение на воде, покрытой легкой рябью (36). 18. Подробное изучение световых столбов (41). 19. Отражение от узкой полосы воды, покрытой рябью (42). 20. Отражение от большой водной поверхности, покрытой волнами (43). 21. Видимость очень слабого волнения (46). 22. Пятна света на поверхности грязной воды (47). 23. Пятна света на снегу (47). 24. Пятна света на дорогах (47). 25. Отражения в лужах во время дождя (48). 26. Световые круги в ветвях деревьев (49).

**Преломление света** . . . . . 51

27. Преломление света при переходе из воздуха в воду (51). 28. Преломление на выпуклой поверхности воды (52). 29. Преломление в неровных стеклах (53). 30. Двойные отражения от зеркального стекла (53). 31. Множественные изображения в зеркальном стекле в проходящем свете (56). 32. Отражение крон дерева в стекле окна (57). 33. Следы стеклоочистителя (58). 34. Капли воды как линзы (58). 35. Радужные цвета в каплях росы и кристаллах инея (59).

**Искривление световых лучей в атмосфере** . . . . . 60

36. Земное искривленне лучей (60). 37. Аномальное искривлеиие лучей без отражения (61). 38. Мираж в миниатюре (64). 39. Большие миражи над горячими поверхностями («нижние миражи») (65). 40. Миражи над холодной водой («верхние миражи») (70).

41. Воздушные замки (71). 42. Искажение Солнца и Луны во время восхода и захода (74). 43. Многократные изображения (78). 44. Зеленый луч (79). 45. Зеленый прибой (84). 46. Красный луч (84). 47. Мерцание земных источников света (84). 48. Мерцание звезд (86). 49. Как измерить мерцание звезд? (89). 50. Когда звезды больше всего мерцают? (89). 51. Мерцание планет (90). 52. Бегущие тени (91).

**Сила и иркость света** . . . . . 93

53. Звезды как источники света известной силы (93). 54. Ослабление света в атмосфере (94). 55. Сравнение звезды со свечой (97). 56. Сравнение двух уличных фонарей (97). 57. Сравнение Луны с уличным фонарем (98). 58. Яркость лунного диска (98). 59. Некоторые соотношения яркости в пейзаже (99). 60. Отражательная способность (100). 61. Прозрачность проволочной сетки (101). 62. Степень непрозрачности леса (102). 63. Просветы в двойном частоколе (103). 64. Фотографическая фотометрия (105).

**Глаз** . . . . . 108

65. Ви́дение под водой (108). 66. Как сделать видимой внутренность глаза (110). 67. Слепое пятно (110). 68. Ночная близорукость (111). 69. Несовершенные изображения, создаваемые глазом (112). 70. Пучки лучей, которые кажутся исходящими от ярких источников света (113). 71. Явления, вызываемые очками (114). 72. Острота зрения (115). 73. Чувствительность прямого и бокового зрения (117). 74. Опыт Фехнера (119). 75. Пейзаж при лунном свете (119). 76. Пейзаж при ярком солнечном свете (120). 77. Пороговое значение отношений яркости (120). 78. Белые предметы ночью (121). 79. Действие вуали (121). 80. Цветные оконные стекла (121). 81. Звезды в сумерках и при свете Луны (122). 82. Видимость звезд днем (123). 83. Иррадиация (123). 84. Слепящее действие света (125).

**Цвета** . . . . . 126

85. Смешение цветов (126). 86. Отражения и игра цвета (127). 87. Цвета коллоидных растворов металлов. Фиолетовые оконные стекла (127). 88. Цвет газосветных трубок; поглощение света в газах (128). 89. Эффект Пуркинье. Колбочки и палочки (129). 90. Цвет очень ярких источников света приближается к белому (130). 91. Впечатление от пейзажа, рассматриваемого сквозь цветные стекла (130). 92. Наблюдения цвета с опущенной головой (130).

**Последовательные образы и контрастные ивлении** . . . . . 131

93. Длительность световых ощущений (131). 94. Явление «частокола» (132). 95. Мерцающие источники света (135). 96. Предельная частота мельканий для центрального и периферического полей зрения (136). 97. «Неподвижное» велосипедное колесо (137). 98. «Неподвижное» автомобильное колесо (138). 99. «Неподвижный» пропеллер самолета (139). 100. Наблюдения вращающегося велосипедного колеса (139). 101. Последовательные образы (141). 102. Явление Елизаветы Линней (143). 103. Изменение цвета в последовательных образах (144). 104. Контраст, получаемый при «одновременном сравнении» (145). 105. Контрастная кайма на стыке различных яркостей (145). 106. Контрастная кайма вдоль границ тени (146). 107. Черный снег (147). 108. Белый снег и серое небо (147). 109. Цве-

товой контраст (148). 110. Цветные тени (149). 111. Цветные тени, возникающие от окрашенных отражений (152). 112. Контрастный треугольник (152).

**Суждения о форме и движении** . . . . . 154

113. Оптические иллюзии, связанные с определением положения и направления (154). 114. Как мы видим движения (155). 115. Движущиеся звезды (156). 116. Вращающийся пейзаж и сопровождающая нас Луна (157). 117. Иллюзии, относящиеся к покою и движению (158). 118. Качающиеся двойные звезды (161). 119. Оптические иллюзии, относящиеся к направлению вращения (161). 120. Стереоскопические явления (162). 121. Иллюзии расстояния и величины (164). 122. «Человечек» на Луне (164). 123. Искривление прожекторного луча. Гряды облаков (165). 124. Кажущаяся сплюснутость небесного свода (166). 125. Переоценка угловой высоты (168). 126. Кажущееся увеличение размеров Солнца и Луны близ горизонта (168). 127. Связь между кажущимся увеличением размера небесных тел близ горизонта и формой небесного свода (170). 128. Вогнутая земля (172). 129. Теория «недооценки» (172). 130. Гауссова теория зрительных направлений (174). 131. Как влияют земные предметы на оценку расстояния до небесного свода (176). 132. Кажущиеся размеры Солнца и Луны в сантиметрах. Метод последовательных образов (177). 133. Пейзаж в живописи (178).

**Радуги, гало и венцы** . . . . . 179

Радуга . . . . . 179

134. Интерференционные явления в дождевых каплях (179). 135. Как образуется радуга (181). 136. Описание радуги (182). 137. Близкие к глазу радуги (184). 138. Декартова теория радуги (185). 139. Дифракционная теория радуги (188). 140. Небо близ радуги (190). 141. Поляризация света в радуге (191). 142. Действие молнии на радугу (192). 143. Красная радуга (192). 144. Туманная или белая радуга (193). 145. Радуга на росе или горизонтальная радуга (194). 146. Отраженная радуга и радуга от отраженного Солнца (195). 147. Отражение горизонтальной радуги (197). 148. Необычные радужные явления (198). 149. Лунная радуга (199).

Гало . . . . . 199

150. Общее описание явления гало (199). 151. Малый круг (201). 152. Паргелии или ложные солнца на малом гало (204). 153. Горизонтальные касательные дуги у малого гало. Описанное гало (206). 154. Косые касательные дуги малого гало или «косые дуги Ловица» (206). 155. Дуга Парри (207). 156. Большой круг или 46° гало (207). 157. Ложные солнца большого гало (207). 158. Нижние касательные дуги большого гало (208). 159. Верхняя касательная дуга большого гало (208). 160. Околозенитная дуга (208). 161. Горизонтальный или паргелический круг (209). 162. Световые или солнечные столбы (210). 163. Световые кресты (211). 164. Субсолнце (211). 165. Двойное Солнце (211). 166. Очень редкие и сомнительные явления гало (212). 167. Косые и искаженные явления гало (213). 168. Степень развития явлений гало (213). 169. Гало в облаках, образовавшихся вслед за пролетевшим самолетом (214). 170. Явления гало, возникающие близ глаза (214). 171. Явления гало на поверхности Земли (216).

Венцы . . . . . 216

172. Цвета интерференции в масляных пятнах (216). 173. Цвета на замерзшем оконном стекле (219). 174. Цвета интерференции в ржавой воде (220). 175. Дифракция света (220). 176. Дифракция света на малых царапинах (221). 177. «Венцы» (222). 178. Объяснение венцов (223). 179. Венцы на оконном стекле (226). 180. Световые венцы, возникающие в глазу (228). 181. Зеленое и синее Солнце (229). 182. Глория (231). 183. Радужные (иризирующие) облака (233). 184. Перламутровые облака (235).

Нимбы . . . . . 236

185. Нимбы на росистых лугах (236). 186. Нимбы на поверхностях без росы (238). 187. Нимб вокруг тени воздушного шара (239).

**Свет и цвет неба** . . . . . 240

188. Рассеяние света дымом (240). 189. Синее небо (242). 190. Воздушная перспектива (243). 191. Свет и цвет в горных районах. Пейзаж, видимый с самолета (245). 192. Почему мы прикрываем глаза рукой. Наблюдения цветов сквозь трубку (245). 193. Опыты с нигрометром (246). 194. Цианометр (прибор для измерения синевы неба) (248). 195. Распределение света по небу (248). 196. Изменчивость цвета синего неба (250). 197. Когда цвет далекого неба оранжевый и когда он зеленый? (251). 198. Цвет неба во время солнечного затмения (253). 199. Поляризация света синего неба (254). 200. Гайдингеровы щетки (пятна Гайдингера) (256). 201. Рассеяние света туманом (259). 202. Рассеяние света в облаках (261). 203. Видимость водяных капель (262). 204. Рассеяние света на траве, покрытой росой (263). 205. Рассеяние света в запотевшем окне (263). 206. Видимость частиц, парящих в воздухе (264). 207. Свет прожектора (265). 208. Видимость (266). 209. Как Солнце «пьет воду» (269). 210. Заря (270). 211. Измерение сумеречных явлений (274). 212. Сумеречные лучи (276). 213. Объяснение сумеречных явлений (277). 214. Есть ли различия между рассветом и закатом? (280). 215. Изменения освещенности во время сумерек (280). 216. «Темнее всего перед рассветом» (281). 217. Утренняя и вечерняя заря как приметы погоды (281). 218. Нарушения нормального течения сумерек (282). 219. Ореол вокруг Солнца (283). 220. Сумеречные перистые облака или ультрацирусы (284). 221. Серебристые облака (284). 222. Ночные световые явления (286). 223. Зодиакальный свет (289). 224. Затмения Луны (293). 225. Пепельный свет (294). 226. «Летающие блюдца» (294).

**Свет и цвет в пейзаже** . . . . . 296

227. Цвет Солнца, Луны и звезд (296). 228. Цвет облаков (299). 229. Цвет облаков на восходе и на закате Солнца (301). 230. Освещение облаков земными источниками света (302). 231. Причины, определяющие цвет воды (304). 232. Цвет придорожных луж (305). 233. Цвет рек и каналов (306). 234. Цвет моря (308). 235. Свет и цвет на Северном море (310). 236. Цвет моря, наблюдаемого с судна (316). 237. Цвет озер (318). 238. Наблюдения цвета воды при помощи николя (319). 239. Шкалы для оценки цвета воды (321). 240. Тени на воде (321). 241. Световой ореол около нашей тени на воде (323). 242. Ватерлиния корабля (324). 243. Цвета водопадов (325). 244. Цвет твердых тел (325). 245. Рассеяние света ветвями деревьев, покрытых инеем (326). 246. Цвет зеленой листвы (327).

247. Прямое влияние света на цвет зеленых листьев (329). 248 Растительность в пейзаже (329). 249. Тени и темные пятна (332). 250. Освещенность пейзажа в направлении к Солнцу и в противоположном направлении (333). 251. Как влажность влияет на цвета (335). 252. Пейзаж после дождя (335). 253. Силуэты (336). 254. Человеческие фигуры в пейзаже (337).

**Светящиеся растения, животные и камни** . . . . . 338

255. Светляки (338). 256. Свечение моря (338). 257. Светящееся дерево, светящиеся листья (340). 258. Кошачьи глаза ночью (340). 259. Отражение света во мху (340). 260. Флуоресценция сока растений (341). 261. Свечение льда и снега (341). 262. Искры от камней (341). 263. Блуждающие огни (342).

**Приложение** . . . . . 343

264. Несколько советов относительно фотографирования природных явлений (343). 265. Как измерять углы (343).

**Фотографии** . . . . . 345

## ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Книга известного голландского астронома профессора Миннарта — не учебник и не популярное изложение давно известных истин. Это поэтический рассказ о больших и малых секретах природы, в которые может проникнуть внимательный наблюдатель, не имеющий каких-либо приборов и не обладающий специальными знаниями.

Эрудиция автора, его удивительное знание мировой, и в частности русской, литературы делает эту книгу интересной не только для читателя, впервые знакомящегося с обширным кругом явлений, охватываемых книгой, но и для читателя-специалиста, который найдет в книге истинную поэзию, так редко встречающуюся в статьях и учебниках.

Перевод был осуществлен с английского издания 1954 г. Г. А. Лейкиным, И. А. Грингольцем и В. А. Маянц и сверен с голландским изданием 1949 г. А. П. Зацепиловой.

Русский перевод был любезно просмотрен проф. Миннартом, который внес в него некоторые исправления и дополнения.

Общая редакция перевода принадлежит Г. А. Лейкину.

## ОТ АВТОРА

Я очень рад, что моя книга «Свет и цвет в природе» переведена на русский язык. Я особенно благодарен П. Г. Куликовскому, которому принадлежит инициатива перевода книги, и Г. А. Лейкину, который вместе с И. А. Грингольцем, А. П. Зацепиловой и В. А. Маянц выполнил перевод. При переводе этой достаточно сложной книги, вероятно, встретилось много трудностей, но он выполнен очень удачно. Было использовано последнее голландское издание, дополненное новыми данными из литературы.

Я бы хотел, чтобы эта книга была моим сердечным приветом советскому народу. Солнце светит над всем миром, свет доставляет радость всем. Пусть свет будет символом мира и дружбы, объединяющим все народы!

*М. Миннарт*

20 апреля 1958 г.

# ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

По мере развития техники все сильнее ощущается стремление к природе, к тесному общению с ней. Однако обычно мы воспринимаем природу как нечто противоположное насыщенной плодами цивилизации обстановке нашей обыденной жизни, нередко забывая, что корни цивилизации, корни науки прочно укреплены именно в природе, в тех явлениях, которые мы повседневно наблюдаем, не обращая на них внимания и не задумываясь над их объяснением. Книга профессора Миннарта посвящена главным образом именно этим явлениям. Профессор Миннарт с редким мастерством показывает, как, наблюдая обычные и необычные явления, можно искать (и находить!) их объяснение, производя измерения, но не пользуясь при этом сколько-нибудь сложными приборами. Книга не ставит (и не может ставить) себе задачей объяснить все тонкости природных оптических явлений — это дело «профессиональной науки», использующей сложные приборы и сложный математический аппарат. Задача книги профессора Миннарта проще, но в то же время и много сложнее,— объяснить суть явления и при этом объяснить ее так, чтобы это, пусть в некоторых случаях и не без труда, было понятно читателю, не имеющему специального образования.

Книга выходит на русском языке вторым изданием. Хотя с момента выхода первого издания круг природных явлений, доступных наблюдению человека, чрезвычайно расширился — и за счет выхода в космос, и за счет проникновения в глубины океана,— книга не потеряла своей ценности. В ней рассматриваются явления, которые при известной наблюдательности доступны каждому, не только космонавту и аквалангисту. Оптика моря и оптика космоса во многих отношениях существенно отличаются от оптики атмосферы, составляющей основное содержание этой книги, и должны быть, по нашему мнению, предметом отдельных популярных изданий. Впрочем, в ряде случаев любознательный читатель сможет распространить объяснения явлений, приведенных в книге, и на явления в космосе и в глубинах океана.

*Г. Лейкин*

*Пешком, с легким сердцем, выхожу на большую дорогу,*
*Я здоров и свободен, весь мир предо мною,*
*Эта длинная бурая тропа ведет меня, куда я хочу.*

*Отныне я не требую счастья, я сам свое счастье,*
*Отныне я больше не хнычу, ничего не отлагаю на завтра*
*и ни в чем не имею нужды.*
*Болезни, попреки, придирки и книги оставлены дома,*
*Сильный и радостный, я шагаю по дороге вперед.*

*Я думаю, геройские подвиги все рождались на вольном*
*ветру и все вольные песни тоже,*
*Я думаю, я мог бы сейчас встать и творить чудеса,*
*Я думаю, что́ я ни встречу сейчас на дороге, то полюбится*
*мне,*
*И кто увидит меня, тот полюбит меня,*
*Я думаю, кого ни увижу сейчас, тот должен быть счастлив.*

*Большими глотками я глотаю пространство,*
*Запад и восток — мои, север и юг — мои.*

*Я больше, чем я думал, я лучше, чем я думал,*
*Я и не знал, до чего я хорош.*

*Теперь я постиг, как создавать самых лучших людей:*
*Пусть они растут на вольном ветру, спят и едят с землею.*

Allons! *Кто бы ты ни был, выходи и пойдем вдвоем!*
*Со мной никогда не устанешь в пути.*
*Земля не утомит никогда*
*Сначала неприветлива, молчалива, непонятна земля,*
*неприветлива и молчалива Природа,*
*Но иди, не унывая, вперед, дивные сокрыты там вещи,*
*Клянусь, не сказать никакими словами, какая красота*
*в этих дивных вещах.*
*Камерадо, я даю тебе руку!*
*Я даю тебе мою любовь, она драгоценнее золота.*
*Я даю тебе себя самого, раньше всех наставлений и запо-*
*ведей;*
*Дашь ли ты мне себя? Пойдешь ли ты со мною в дорогу?*
*Будем ли мы с тобой неразлучны до последнего дня нашей*
*жизни?*

(*Уолт Уитмен, Песня большой дороги. Из сб. «Листья травы»*).

*Прежде всего мы будем иметь дело с опытами при полном дневном освещении. Мы выведем наблюдателя на открытый воздух, не оставляя его, как повелось, в темной, мрачной комнате.*

*(Гете, Учение о цветах.)*

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Тот, кто любит природу, не может существовать вдали от нее: любоваться природой для него так же необходимо, как жить и дышать. Он *наблюдает* природу в ясный день, и в дождь, и в жару, и в холод; в лесах и селениях, на суше и на море — повсюду он находит что-нибудь занимательное. Каждое мгновение вокруг него совершаются удивительные события. Без устали бродит он по окрестностям, ко всему присматривается, прислушивается к едва уловимым шорохам, вдыхает аромат полей и лесов, чувствует каждое изменение температуры, проводит рукой по кустам, чтобы почувствовать себя ближе ко всему земному; он — человек, наделенный высшим чувством сознания полноты жизни.

Вы ошибаетесь, если думаете, что для человека, наблюдающего природу с научной точки зрения, пропадают ее поэзия и краски. Привычка наблюдать утончает наше ощущение красоты; богатый красками мир делается еще ярче и на его фоне становятся еще заметнее отдельные явления природы. Для такого наблюдателя гармонично соединяется воедино все происходящее вокруг, становится ясней взаимосвязь явлений, понятнее причины и следствия происходящих в природе событий — *обычному же* наблюдателю явления природы представляются рядом не связанных между собой сцен.

Часть описанных в этой книге явлений встречается в повседневной жизни; вам будет интересно узнать, как они объясняются с научной точки зрения. В книге описаны и такие повседневные явления, которых вы до сих пор не замечали; правда, от вас самих зависит прозрение — вам стоит лишь дотронуться до своих глаз магическим жезлом под названием «знай, на что смотреть». И, наконец, здесь вы найдете описание тех чудесных явлений природы, которые случаются настолько редко, что даже самому опытному наблюдателю приходится ждать годами, чтобы увидеть их; и когда, наконец, ему это удается, он испытывает глубочайшее удовлетворение от сознания, что наблюдает столь редкое событие.

Как это ни странно, но обычно мы видим лишь то, с чем уже знакомы; мы редко замечаем что-либо новое, до тех пор нам неизвестное, даже если оно находится прямо перед нашими глазами. В древние времена и средние века люди наблюдали множество солнечных затмений, однако солнечная корона едва ли была замечена до 1842 г., а в наши дни в момент полного солнечного затмения именно корона представляется самым замечательным явлением; ее можно легко видеть невооруженным глазом. В этой книге я пытался собрать факты, которые постепенно становились известными человечеству благодаря деятельности многих крупных ученых, посвятивших себя изучению природы. Нет сомнения, что многое в природе еще не замечено; ежегодно печатаются все новые научные труды, освещающие все новые явления; и удивительно, до какой степени мы бываем глухи и слепы, не замечая вокруг себя того, что непременно привлечет внимание в будущем.

Обычно, когда говорят о «наблюдении природы», имеют в виду изучение растений и животных. Но разве ветер и погода, облака, тысячи звуков, заполняющих пространство, волны, лучи Солнца, землетрясения — разве это не та же природа? Книга об этом должна быть очень интересна; для изучающего физику неживого она так же необходима, как книга о флоре и фауне для биологов. В этой книге мы не сможем миновать областей, где царит метеоролог, и областей, граничащих с такими науками, как астрономия, география, биология, но, я надеюсь, мы найдем единую точку зрения, и связь между всеми рассматриваемыми явлениями станет ясной.

Поскольку нас будет занимать лишь простое непосредственное наблюдение природы, мы не должны:

1) пользоваться приборами; вместо этого мы должны положиться на наши ощущения; это — наши главные помощники, и потому мы должны хорошо знать их свойства;

2) делать выводы, основанные на статистическом анализе;

3) прибегать к теоретическим рассуждениям, не вытекающим прямо из того, что мы видим.

Мы убедимся, что даже при таких условиях остается удивительно много возможностей для наблюдений; и действительно, едва ли можно указать хоть одну область физики, которая не нашла бы себе приложения на открытом воздухе, причем чаще всего такие опыты происходят в масштабах куда более значительных, чем в лаборатории. Пусть читатель все время помнит, что все описанное в этой книге можно наблюдать и постичь самому. Он может сам все увидеть и сам все проделать!

Если некоторые объяснения покажутся слишком краткими, мы советуем читателю освежить в своей памяти соответствующие основные положения физики, используя для этого какой-либо учебник.

Многие еще до сих пор не осознали важности наблюдений на открытом воздухе для преподавания. Но именно наблюдения вне стен лаборатории помогают нам применить полученные нами знания в повседневной жизни; такие наблюдения естественно ведут к тому, что у нас возникают тысячи вопросов. В конце концов за стенами школы мы обнаруживаем все новые и новые подтверждения тому, что мы учили за партой. Таким образом мы убеждаемся в общности законов природы, и они предстают перед нами как поразительная и величественная реальность.

Эта книга написана для всех, кто любит природу: для молодежи, путешествующей по необъятному миру, собирающейся на привале у костра; для художника, который любуется цветами и светом в пейзаже, но не понимает причины их возникновения; для тех, кто живет в деревне; для всех, кто любит странствовать, а также для тех, кто живет в городе и для кого явления природы не исчезают даже в шуме и грохоте улиц. Мы надеемся, что даже для опытного физика в этой книге может оказаться кое-что новое, так как

некоторые явления, описанные в ней, выходят за пределы общего курса физики. Вот почему в книге встречаются описания как простых, так и значительно более сложных наблюдений.

Вполне вероятно, что эта книга является первой в своем роде, и потому она окажется далеко не совершенной. Я чувствую себя просто подавленным красотой и обилием материала, и боюсь, что не смогу изложить его так, как он того заслуживает. В течение 20 лет я систематически проводил опыты, а также просмотрел несколько тысяч статей, помещенных в различных периодических изданиях; правда, здесь я цитирую лишь те статьи, которые либо исчерпывающе описывают явление, либо проливают свет на какие-либо сугубо специальные вопросы. Я ясно отдаю себе отчет в том, что собранная мною коллекция фактов все еще далеко не полна. Многое, уже открытое, мне еще не известно, а многое остается еще не разгаданным даже профессионалами. Я буду весьма благодарен тем, кто с помощью своих наблюдений или хотя бы указанием на литературные данные пожелает помочь мне в исправлении имеющихся здесь ошибок или пробелов.

Основные общие труды об оптических явлениях в природе:

P e r n t e r-E x n e r, Meteorologische Optik (Wien—Leipzig, 1922); H u m p h r e y s, Physics of the Air (New York, 1929); J e n s e n, Handbuch der Physik, X1X, 70, Handbuch der Geophysik, Bd. V1II, (Berlin, 1955—56); S. W. V i s s e r, Optische Verschijnselen aan de Hemel (den Haag, 1957); Б р о у н о в П. И., Атмосферная оптика (Гос. техн. изд-во, 1924).

# СОЛНЕЧНЫЙ СВЕТ И ТЕНИ

## 1. Изображения Солнца

*О Солнце!... Там, где тень от лип густа и ароматна,*
*Кидаешь ты такие пятна,*
*Что жалко мне ступать по ним.*

*(Э. Ростан, Певец зари, Ода Солнцу.)*

В тени группы деревьев мы видим беспорядочно раскинутые на земле пятна света различной величины, но одинаковой правильной эллиптической формы. Поместите карандаш перед одним из них; линия, соединяющая карандаш и его тень, указывает направление лучей света, образующих это маленькое пятно на земле. Это, конечно, солнечные лучи, проникающие сквозь просветы в кроне дерева; вверху между листьями глаз действительно видит ослепляющие яркие пятна света.

Вызывает удивление то, что все эти пятна имеют одинаковые очертания, а ведь трудно предположить, чтобы все щели и отверстия в листве оказались до такой степени похожими и округлыми! Перехватите одно из этих изображений листом бумаги, располагая его перпендикулярно к падающим лучам; вы увидите, что пятно уже не эллиптическое, а круглое. Поднимите лист бумаги выше — пятно становится все меньше и меньше. Отсюда мы сделаем вывод, что пучок лучей, образующих такое пятно, имеет форму конуса, а пятно кажется эллипсом, поскольку пучок лучей падает на поверхность Земли под углом.

Причину этого явления следует искать в том факте, что Солнце не есть просто точка. Любое очень малое отверстие $P$ (рис. 1) образует небольшое, хорошо очерченное изображение Солнца $AB$, другое малое отверстие $P'$ дает несколько смещенное изображение $A'B'$ (пунктирные линии); более широкое отверстие, включающее в себя как $P$, так и $P'$, дает менее резкое, но более яркое изображение Солнца $A'B$. Действительно, мы можем в тени видеть пятна света различной степени яркости, и если имеется два пятна равной величины, то более яркое из них в то же время менее резко очерчено.

В подтверждение этого обратите внимание на следующее: когда перед Солнцем проходят облака, можно увидеть, как они скользят

в каждом световом пятне, но в противоположном направлении Во время частного затмения Солнца все изображения Солнца имеют серповидную форму. Когда на Солнце есть большое пятно, его можно увидеть на наиболее резком изображении. Вы получите четкое изображение Солнца, вырезав маленькое круглое отверстие в листе

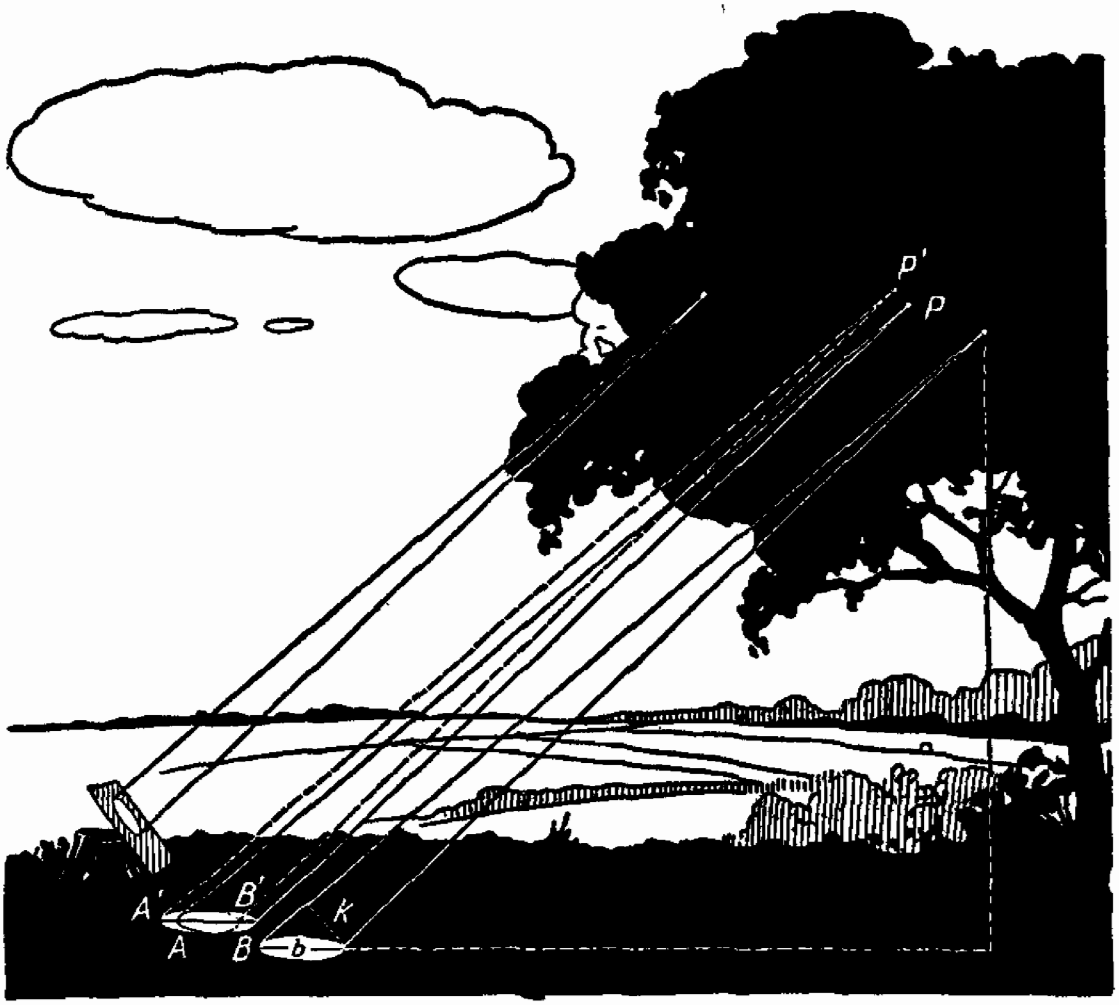



Рис. 1. Солнечные лучи, проникающие через густую листву.

тонкого картона и держа его так, чтобы изображение упало в хорошо затененное место. Посмотрите, как выглядит изображение Солнца, образованное квадратным отверстием на разных расстояниях от этого отверстия.

Угол, под которым мы видим солнечный диск, должен быть углом $APB$ у вершины конуса, образующего изображение Солнца. Подобные малые углы чаще всего измеряются в *радианах*. Мы говорим «угол $APB$ равен $^1/_{108}$ радиана», имея в виду, что Солнце можно закрыть диском диаметром 1 *см* на расстоянии 108 *см* или диаметром 10 *см* на расстоянии 1080 *см* от глаза (рис. 2). Отсюда следует, что диаметр четкого изображения Солнца должен быть равен $^1/_{108}$ части расстояния этого изображения от отверстия, а для расплывчатого изображения следует еще прибавить поперечник отверстия в листве. Перехватите листом бумаги неяркое, но четко очерченное изображение Солнца, держа бумагу перпендикулярно к солнечным лу-

чам, измерьте диаметр светового пятна $k$ и с помощью куска бечевки определите расстояние $L$ от бумаги до отверстия в листве. Действительно ли диаметр $k$ равен приблизительно $L/108$ (см. рис. 1)?

Если изображения Солнца на ровной поверхности представляют собой эллипсы, нужно измерить обе оси — короткую ось $k$ и

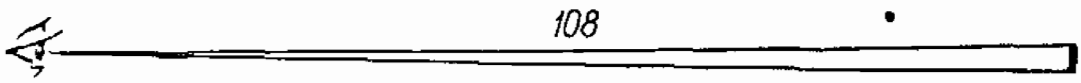



Рис. 2. Мы видим диск Солнца под углом 1/108 радиана.

длинную ось $b$; отношение между ними равно отношению между высотой дерева $H$ и расстоянием $L$. Следовательно,

$$H = \frac{k}{b} L = 108k \cdot \frac{k}{b}.$$

Таким способом было найдено, что оси чрезвычайно большого изображения Солнца, образованного листвой букового дерева, равны 53 *см* и 33 *см*; высота отверстия над землей была, следовательно, 2200 *см* или 22 *м*.

Пронаблюдайте Солнце утром и в полдень; вы увидите, что утром изображения Солнца имеют более вытянутую форму, а к полудню они приближаются к кругу.

Хорошие изображения Солнца можно найти в тени буков, лип, ясеней, реже — в тени тополей, вязов, платанов.

Посмотрите на изображения Солнца, образованные деревьями, растущими на берегах мелких водоемов; на дне водоемов эти изображения имеют очень причудливую форму.

## 2. Тени

Посмотрите на вашу собственную тень на земле. Тень ног резко очерчена, тень головы более расплывчата. Тень нижней части ствола дерева или столба отчетлива, в то время как тень более высоких частей становится все более и более расплывчатой.

Держите руку перед листом бумаги; вы увидите четкую тень. Отодвиньте руку от бумаги. Полная тень каждого пальца становится все у́же, в то время как полутени все больше увеличиваются, пока не сольются друг с другом *).

Это явление, как и изображения Солнца, подтверждает тот факт, что Солнце не представляет собой просто точку. Обратите внимание на тень летящей бабочки или птицы (мы так редко их замечаем!); вы увидите, что тень круглая; это — «теневое изображение Солнца».

*) Goethe, Farbenlehre, I, 1, 394—395.

Однажды меня поразила странная тень забора из проволочной сетки, состоявшей из прямоугольных ячеек. Были видны лишь тени от вертикальных проволок; горизонтальные проволоки тени не давали! Если лист бумаги с проделанными в нем отверстиями держать так, чтобы на него падали лучи Солнца, то каждое отверстие образует на земле эллиптическое световое пятно; представьте себе, что тень от проволоки получается благодаря наложению таких небольших эллипсов, только темных, которые помещены очень близко друг к другу; тень получается довольно резкой, когда проволока расположена в направлении длинной оси эллипсов, и расплывчатой, когда проволока расположена в направлении короткой оси (рис. 3).

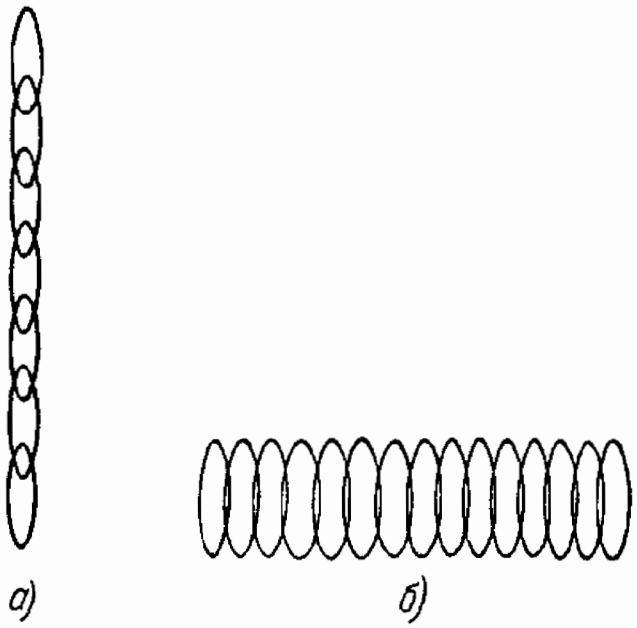



Рис. 3. Тени от железной проволоки в наклонно падающих лучах Солнца: *а*) четкая тень; *б*) нечеткая тень.

Держите лист бумаги непосредственно за проволочной сеткой, и затем отодвигайте его все дальше и дальше так, чтобы можно было проследить постепенное появление замечательных теней. Проделайте подобные же опыты, когда лучи Солнца падают на землю под различными углами; рассмотрите также тени от косых ячеек и т. п.

Теням уделялось большое внимание в фольклоре. Обычно считалось страшным предзнаменованием потерять свою тень. Люди верили, что человек, тень которого не имела головы, обречен на смерть в течение года. Такие сказки, существовавшие у всех народов и во все времена, особенно интересные; они показывают, как осторожно нужно относиться к утверждениям неопытных наблюдателей, как бы эти наблюдатели ни были многочисленны и единодушны.

## 3. Изображения Солнца и тени во время солнечных затмений и заката

Во время солнечного затмения мы наблюдаем, как темная Луна скользит перед солнечным диском, постепенно заслоняя его, и через некоторое время остается видимым лишь узкий серп. В этот момент маленькие изображения Солнца под листвой напоминают миниатюрные серпы, повернутые все в одном направлении и различающиеся между собой по величине и по яркости.

Очертания теней при солнечном затмении подвержены подобным же изменениям. Тени от пальцев, например, начинают по форме напоминать когти. Всякий маленький темный объект в это время дает серповидную тень; тень небольшого прута состоит из боль-

шого числа подобных серпов, причем на конце тень оказывается искривленной.

Хорошим примером отдельного темного объекта может послужить воздушный шар. Действительно, было отмечено, что во время солнечного затмения тени как самого воздушного шара, так и корзины имеют форму серпа *). Если самолет летит достаточно высоко, тень от него также имеет изогнутую форму **).

Солнечные затмения, даже частные, происходят очень редко, однако подобные тени можно видеть, когда Солнце садится в открытом море, если наблюдать тени от монет и дисков разных размеров, наклеенных на оконное стекло или висящих на проволоке. Форма тени и распределение света в ней меняются в зависимости от величины монет и от степени погружения солнечного диска под горизонт.

## 4. Двойные тени

Осенью, когда деревья уже потеряли всю листву, мы часто видим тени от двух параллельных ветвей наложенными одна на другую. Ближняя ветвь дает резкую темную тень, дальняя — более широкую и сероватую. Удивительно здесь то, что когда такие две тени случайно падают друг на друга, мы видим яркую светлую полосу посередине более темной тени, так что последняя выглядит как бы двойной (рис. 4). Как это можно объяснить?

Предположим, что более далекая ветка толще, чем ближняя. Чтобы определить освещенность на земле в различных точках тени и в точках поблизости от нее, вообразим, что мы смотрим на Солнце попеременно из всех этих точек. Сначала представим себе, что наш глаз помещается в точке, которая расположена в 10—20 *см* в стороне от тени; мы увидим, что нас освещает весь солнечный диск. Далее предположим, что мы слегка сместили глаз до положения *A* (рис. 4), оказавшись, таким образом, в полутени от дальней ветки. Теперь перед солнечным диском нам видна эта ветка; поскольку она как бы заслоняет часть солнечного диска, освещенность той точки, где предполагается наш глаз, уменьшается. Сдвигаем глаз до положения *B*; теперь и вторая ветка оказывается перед Солнцем; обе ветки вместе преграждают путь значительной части света. Передвигаем глаз дальше, пока он не достигнет положения *C*, где обе ветки как бы накладываются одна на другую. Теперь часть солнечного диска, лучи которого перехвачены ветками, опять стала м е н ь ш е, освещенность земли, которую мы принимаем за наш экран, опять у в е л и ч и л а с ь. Когда мы видим подобную тень на земле, мы должны

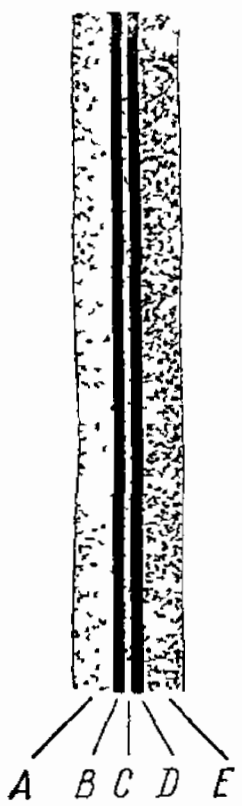
---

*) A. W i g a n d und E. E v e r l i n g, Verh. d. d. Phys. Ges. **14**, 748, 1912; Deutsche Luftfahrer Ztg. **16**, 298, 1912.

**) Science, около 1930 г.

себе представить все случаи, которые мы рассмотрели выше; тогда становится ясным, почему центральная полоса всей тени ярче, чем примыкающие к этой светлой полосе части тени слева и справа.

На рис. 4 схематически показано, каким мы увидим солнечный диск, помещая глаз попеременно в точках *A*, *B*, *C*, *D*, *E*; при этом предполагается, что дальняя ветка толще, чем ближняя.




Очевидно, такое явление можно наблюдать в том случае, если угловое расстояние между ветвями меньше, чем видимый диаметр солнечного диска.

Это же явление можно наблюдать на тени телеграфных столбов, когда они перекрывают друг друга.

Возьмите в руки книгу и держите ее так, чтобы тень от нее обрисовывалась в слабом свете очень большого изображения солнечного диска, и вы увидите, что тень книги будет намного резче, чем обычная.

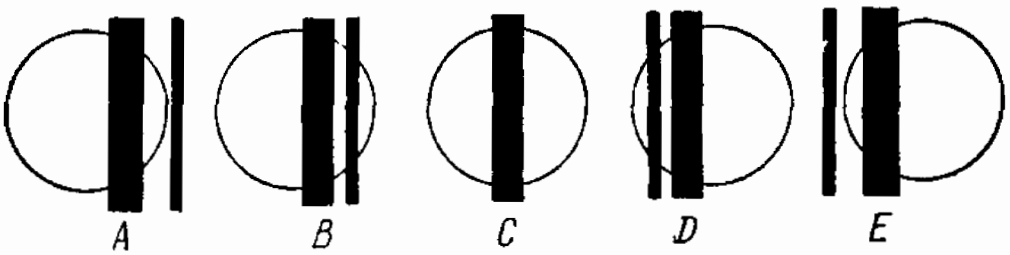



Рис. 4. Как возникают двойные тени.

Выберите место, где высокие тонкие побеги бросают нечеткую тень и подержите над ней карандаш, и вы сразу же получите двойную или многократную тень, в которой один компонент будет сильнее или слабее, чем другие. На этом же самом месте подержите книгу и вы увидите, что тень ее будет иметь необыкновенно четкие края полутени.

«Как-то я гулял на берегу моря... Был вечер в конце марта. На западе за горизонт садилось Солнце, ярко светила Луна на востоке. Долго закат отбрасывал мою тень на восток; но затем на мгновение тень совсем исчезла и появилась снова на западе, когда Луна стала светить сильнее вечерней зари».

(S. Nordal, Hei.)

Было ли это наблюдение правильным?

# ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА *)

## 5. Закон отражения

Найдите место, где Луна отражается в очень спокойной поверхности воды. Сравните угловую высоту Луны над горизонтом и угловое расстояние отражения Луны под горизонтом; обе величины окажутся одинаковыми в пределах ошибки наблюдения.

Если Луна стоит в небе невысоко, вытяните руку, держа в ней палку таким образом, чтобы конец ее оказался у диска Луны, а большой палец вашей руки отметил на палке уровень горизонта. Затем поверните палку книзу так, чтобы рука послужила осью, и посмотрите, касается ли кончик палки отражения Луны. Аналогичные измерения, выполненные над звездами с помощью телескопа, служат наиболее точной проверкой закона отражения.

Лучи Солнца, стоящего не слишком высоко над горизонтом, попадают в окно, расположенное глубоко в стене (рис. 5). Тень $AB$ показывает направление падающего луча; отраженный свет падает более ярким пятном в направлении $BC$. Ясно видно, что оба направления симметричны относительно перпендикуляра $BN$, и поэтому $\angle ABN = \angle CBN$. Это положение само по себе не есть закон отражения, но является его следствием. Докажите это.

Почему окна далеких домов отражают только восходящее или заходящее Солнце?

## 6. Отражение от проводов

На солнце поблескивают телеграфные провода; если вы пойдете вдоль линии проводов, солнечные блики на них будут двигаться с той же скоростью, что и вы. Точно так же вечером уличный фонарь бросает яркий блик света на трамвайный провод. Чем определяется место этого светлого пятна?

Попробуйте мысленно построить эллипс, касающийся проволоки так, чтобы ваш глаз и источник света находились в фокусах (рис. 6). Освещенное пятно на проволоке — это точка касания; из хорошо известного свойства эллипса вытекает, что линии, соединяющие любую точку с фокусами, составляют равные углы с касательной плоскостью.

*) См. M. P o l l o c k, Light and Water, London, 1903,

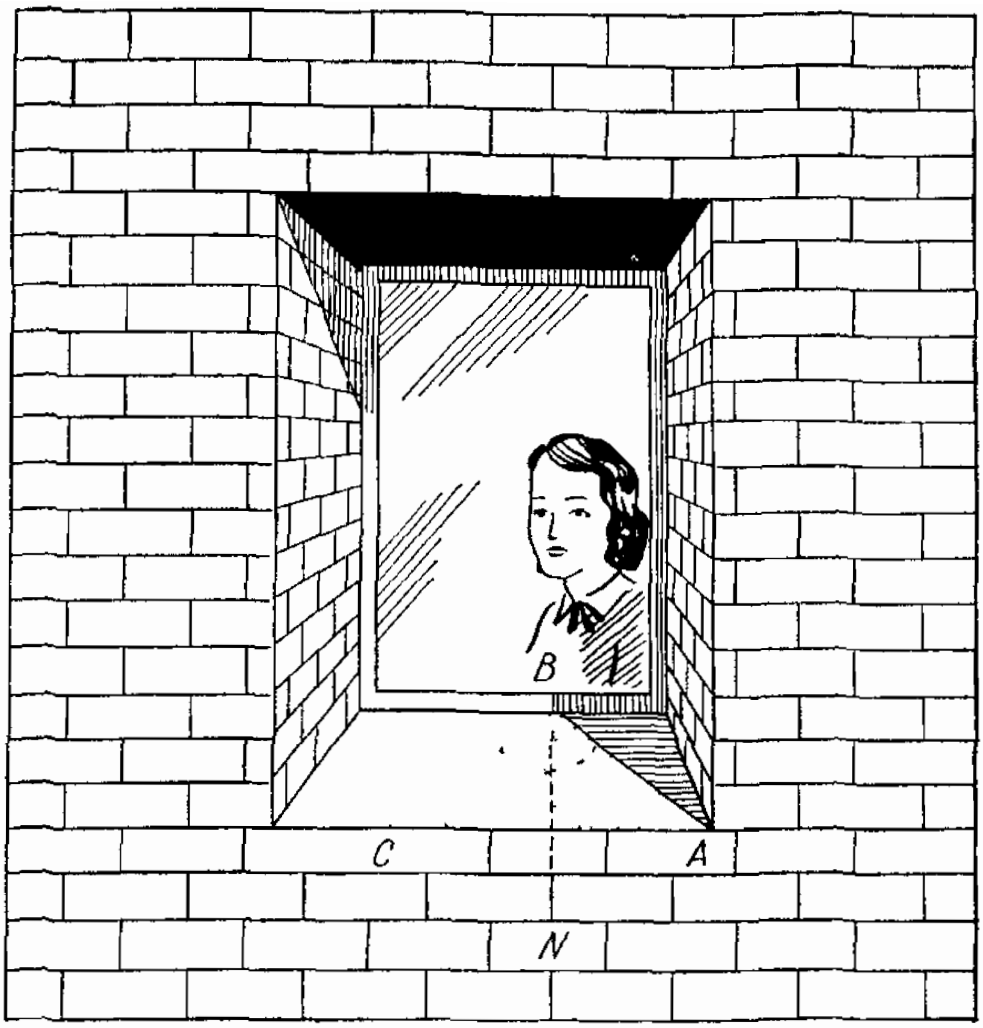



Рис 5 Солнечный свет, отраженный от окна, расположенного глубоко в стене

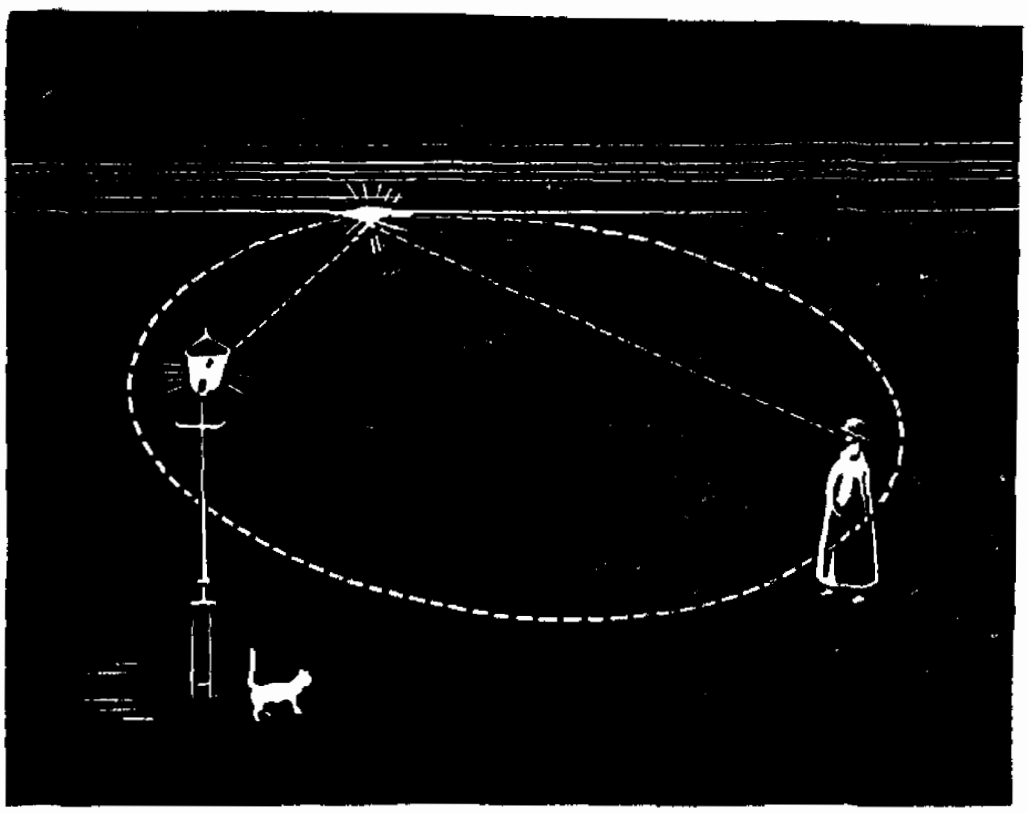


Рис 6 Отражение уличного фонаря от телеграфной проволоки

## 7. Различие между предметом и его отражением

Многие думают, что пейзаж, отраженный в спокойной воде, ничем не отличается от реального пейзажа, и только перевернут вверх ногами Это очень далеко от истины! Взгляните, как ночью отражается в воде ряд уличных фонарей (рис. 7). Отражение дамбы,

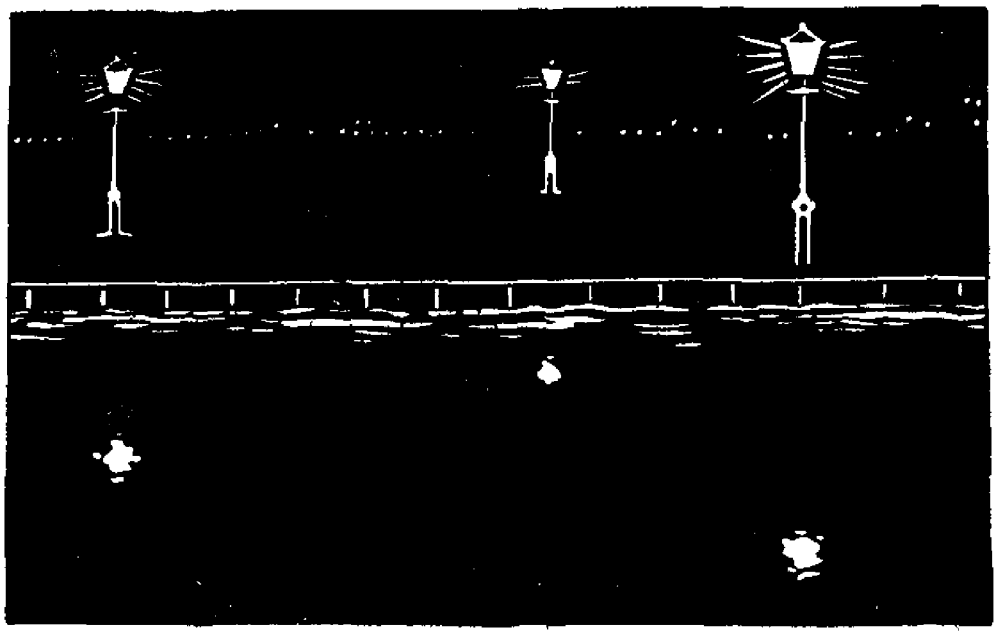


Рис. 7. Отражение может отличаться от самого предмета!

спускающейся к воде, кажется укороченным и даже совсем исчезает, если мы находимся сравнительно высоко над поверхностью воды (рис. 8).

Чем ближе будут расположены к нам предметы, тем ниже будут опускаться их отражения Вам никогда не удастся увидеть отражение самой верхушки камня, наполовину лежащего в воде!

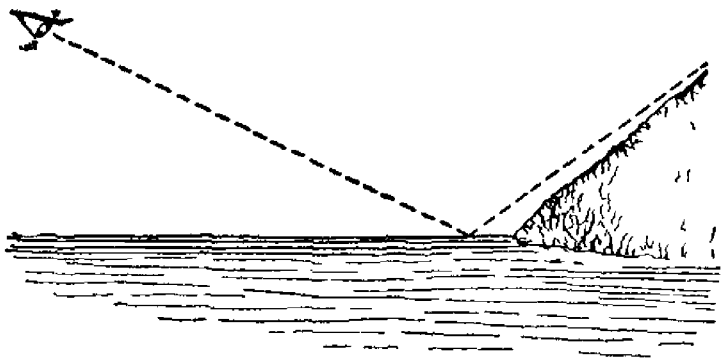


Рис 8. Сокращение отражения крутого склона

Несколько примеров на рис. 9 подтверждают это положение. Рис 9, *а* показывает, что наблюдатель видит Луну выше башни, в то время как в отражении Луна загорожена колокольней. Пример

такого же рода дан на рис. 9, *б*. В отражении колокольня опускается ниже Луны, а верхушка близстоящего дерева кажется ниже башни.

Сравните также (рис. 9, *в*) расположение дерева и цепи гор, виднеющихся вдалеке: эффект будет особенно убедительным и напомнит нам целый ряд картин, бессознательно запечатленных когда-то в памяти.

Все это не вызывает удивления, если принять во внимание, что отражение действительно точно соответствует самому пейзажу и отличается лишь перспективой, которая оказывается смещенной.

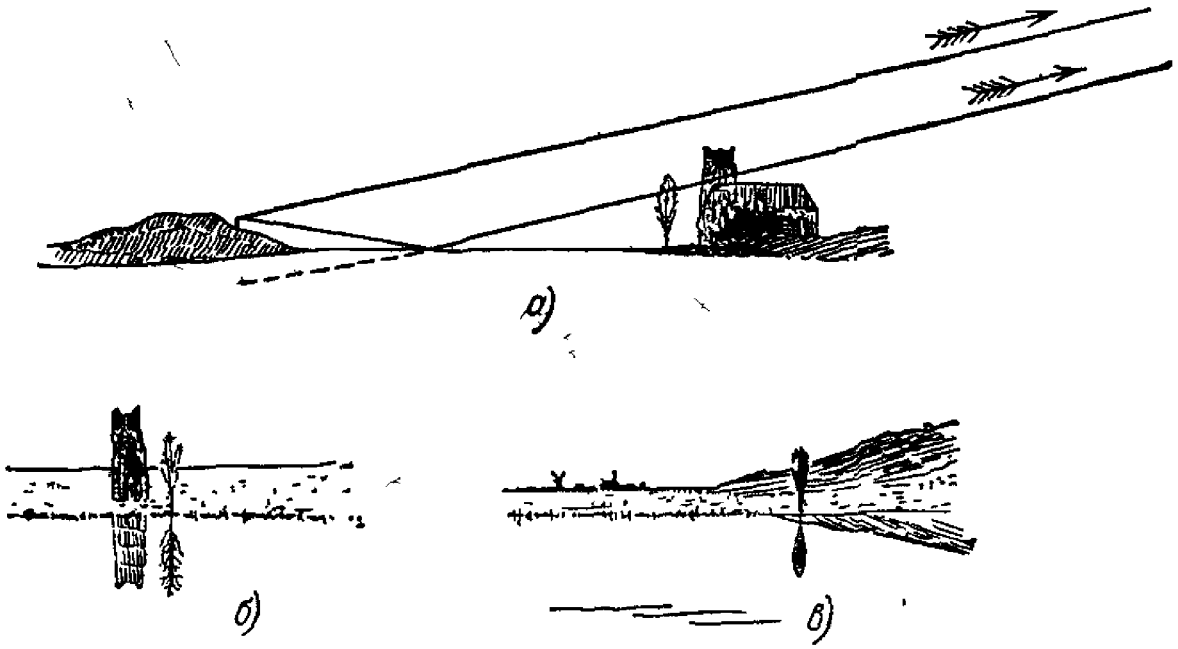



Рис. 9. Различие между пейзажем и его отражением. Стрелки на верхнем рисунке указывают направление к Луне.

Мы видим ландшафт так, как если бы мы смотрели на объект из точки, расположенной на столько же ниже поверхности воды, на сколько наш глаз находится выше нее. Различие это уменьшается с приближением нашего глаза к уровню воды и с удалением объекта (ср. § 5, 146).

Однако следует рассмотреть и еще одну сторону явления. Часто можно заметить, что отражения деревьев и кустов в маленьких прудах и лужах, расположенных вдоль дороги, обладают бо́льшей ясностью и чистотой красок и теплотой тонов, чем сами предметы. Облака, отраженные в зеркале, всегда кажутся красивее. Очень отчетливо отражение улицы в витрине, завешенной темной шторой *). Причина здесь, пожалуй, скорее психологического, нежели физического характера. Некоторые считают, что отраженный ландшафт оказывает на нас такое же впечатление, как и картина, вся лежащая в одной плоскости (с физической точки зрения отражения располагаются в различных плоскостях подобно самим объектам). Возможно, что из-за рамы мы не представляем себе действительного

*) H. R. Mill, Geogr. J. **56**, 526, 1926; Vaughan Cornish, там же, 518.

расположения в пространстве изображенных на картине предметов, и это чувство неуверенности как бы подчеркивает рельефность *). С моей точки зрения, наиболее важной причиной, по-видимому, является то, что глаз не ослеплен громадным ярким пространством неба вокруг наблюдаемого предмета, и это по своему характеру напоминает наблюдение через трубу (§ 192). Более того, уменьшившаяся яркость отражения сама по себе облегчает нам наблюдение неба и облаков, которые при прямом наблюдении оказываются слишком яркими для глаза.

Однажды я шел вдоль берега Эны, мучаясь от неизъяснимой боли, на что не было никакой определенной причины, и поэтому боль казалась неизлечимой. Картина моста, отраженного в воде, вдруг сразу же вернула мне уверенность и чувство радости, а это было только отражение.

Но не верьте, если кто-нибудь вам скажет, что это было только отражение.

(D u h a m e l, La Possession du Monde.)

## 8. Лучи света, отраженные в каналах и реках

В солнечную погоду всякая спокойная поверхность воды отражает луч солнечного света, и этот луч поднимается над ландшафтом, как луч огромного прожектора (рис. 10). Но заметить такие лучи можно не часто: для этого нужно редкое сочетание благоприятных условий.

Чаще всего их можно увидеть утром или вечером, когда Солнце находится низко над горизонтом и отражение бывает наиболее сильным (§ 60). Лучи света должны быть видимы в воздухе при легком тумане; однако при густом тумане, когда яркость лучей быстро ослабевает, а нависшая над всем световая завеса стирает тонкие различия в яркости, вести наблюдения нельзя. Речка или канал должны быть расположены так, чтобы лучи Солнца могли свободно падать на поверхность воды.

Я пришел к выводу, что при таких наблюдениях лучше смотреть в направлении к Солнцу, а не в обратную сторону; в этом случае рассеивание сильнее и лучи заметнее (§ 206). Поверхность воды не должна быть покрыта рябью, ветер пусть лучше будет слабее и направлен поперек канала. В этом отношении благоприятны высокие берега, но они не должны быть слишком высокими, чтобы не преграждать путь падающим и отраженным лучам. Поднимающийся кверху световой луч будет виден тем лучше, чем длиннее и прямее будет канал.

На основании опыта к этому можно еще добавить, что левая сторона поднимающегося кверху «светового луча» будет обрисовываться резче, если наблюдатель находится на левой стороне канала.

---

*) J. Optic. Soc. Amer. 10, 141, 1925.

При благоприятных условиях это удивительное зрелище можно наблюдать у простых канавок, которых так много у нас в Голландии.

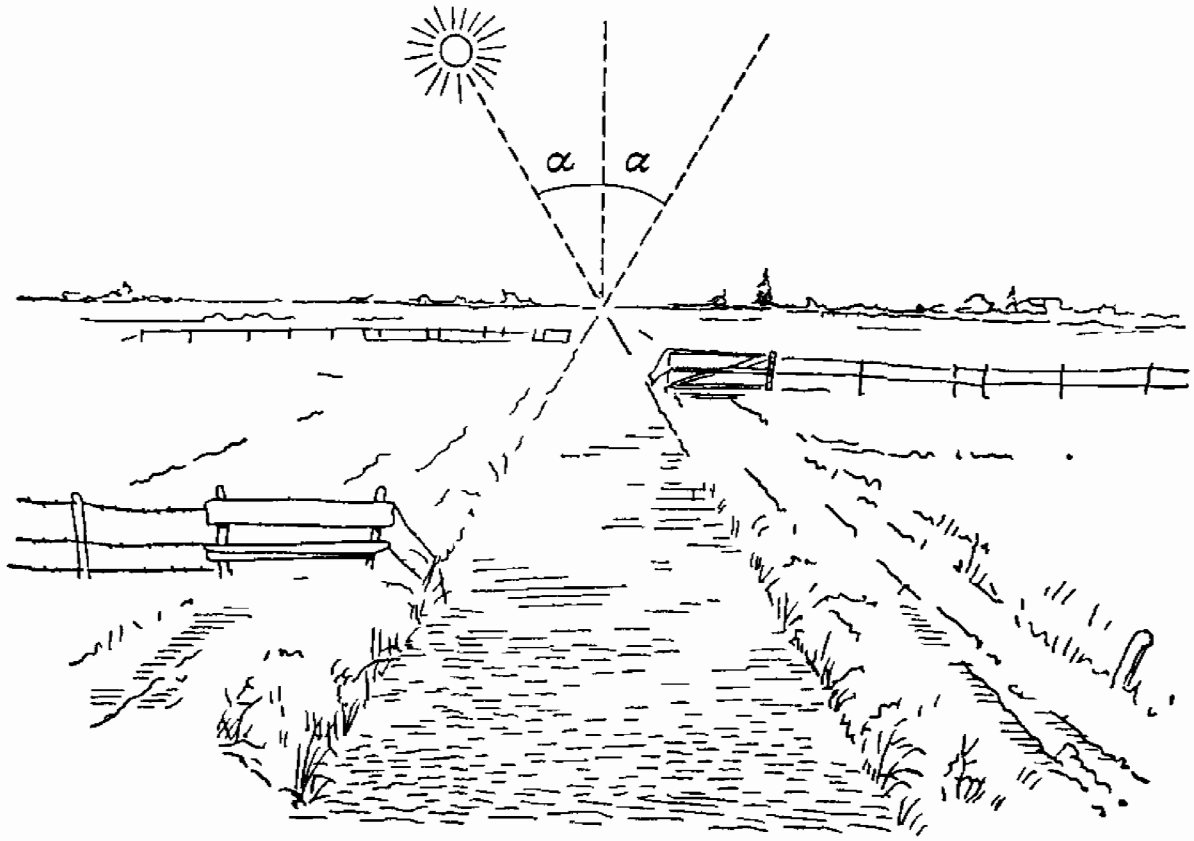



Рис 10 Пучки отраженных от канала лучей Солнца четко вырисовываются в воздухе

Для того чтобы заметить это явление, наблюдатель должен находиться недалеко от канала или реки

## 9. Необычные отражения (фотография I*))

На улице среди тени, отбрасываемой домами, неожиданно то там, то здесь можно увидеть пятна света (рис 11) Как туда попадает свет? Подержите руку перед таким пятном света и по положению тени определите, откуда падают лучи Оказывается, они отражены окнами домов на противоположной стороне улицы

Равным образом можно увидеть пятна света, сверкающие на поверхности канала, когда сам канал находится в тени Эти пятна отбрасываются домами на другой стороне канала

Дома вдоль берега стоят в тени и, однако, на них все время появляются световые блики, движущиеся полоски света Это — отражения от волн на воде (рис 12) Часть волны $AB$ отражает свет как вогнутое зеркало и собирает лучи в $L$, другая часть волны $BC$ менее изогнута и собирает лучи в месте более далеком Таким образом, на любом расстоянии от стены существует участок водной поверхнос-

*) Фотографии, отмеченные римскими цифрами, помещены в конце книги

ти, который дает отчетливый блик на стене, в то время как остальные части поверхности создают общее освещение Подобные же явления можно наблюдать вдоль набережных и под арками мостов Здесь мы имеем фактически модель мерцания звезд (ср § 48)

Великолепное зрелище — сверкание солнечного света на поверхности воды в канале, покрытой благодаря свежему бризу рябью,

Рис 11 Пятна солнечного света на узкой темной улице

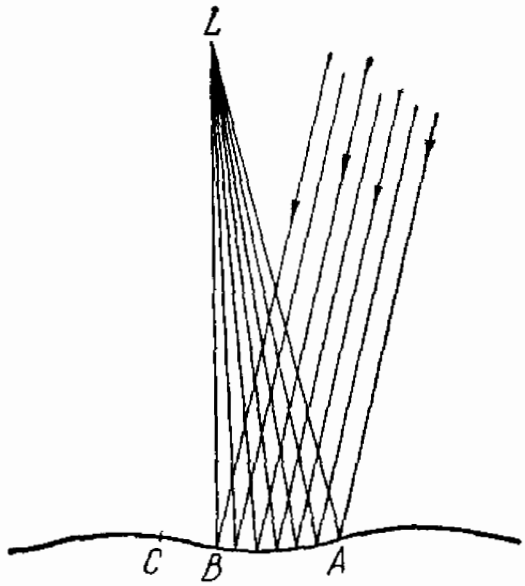



Рис 12 Образование движущихся полос света при отражении от слегка взволнованной воды

переходящей местами в маленькие волны Тысячи ярких искорок ритмически вспыхивают и гаснут раз пять в секунду — и все это почти одновременно происходит по всей поверхности канала

Этот период совпадает со временем перемещения одной волны (проследите, так ли это?) Каждый раз после такого интервала картина повторяется, однако, из-за неравномерности ветра сверкание не везде бывает ритмичным

## 10. Стрельба по отражениям

Около Зальцбурга есть озеро Кенигзее, оно окружено высокими горами, и поэтому поверхность его всегда очень спокойна Здесь проводятся соревнования по стрельбе Соревнующиеся целятся не в мишень, а в ее отражение в воде озера, причем пуля попадает в цель рикошетом, отскочив от воды Вероятность попадания, по-видимому, так же велика, как и при прямом выстреле

Замечательно то, что пуля не отскакивает от поверхности воды, а проникает (хотя и неглубоко) в воду. Гидродинамика показывает, что движущаяся пуля выталкивается из жидкости по направлению к поверхности и в результате пуля выходит из воды под тем же углом к поверхности, под которым она входила в нее. Движение пули было прослежено при помощи экрана, опущенного в воду *).

## 11. Гелиотроп Гаусса

Поместите маленькое зеркало так, чтобы оно отражало солнечный свет. Отражение, полученное вблизи от зеркала, имеет те же очертания, что и само зеркало; дальше оно становится менее отчетливым, еще дальше — круглым; на большом расстоянии это — действительное изображение Солнца. Закройте теперь часть зеркала. Световое пятно остается круглым, но тускнеет. Трудно проследить пятно на расстоянии больше 50 *м*, но наблюдатель сможет и на этом расстоянии увидеть зеркало, все еще ярко сверкающее на Солнце.

Укрепите зеркало в зажимах или между двумя камнями где-либо в открытом месте, чтобы отраженный луч был совершенно горизонтальным. Удаляйтесь от этого места все дальше и дальше, но не теряя из виду свет. Вы заметите, что это довольно трудно, но, к счастью, диаметр луча все время увеличивается по мере вашего удаления; отклоняясь в сторону, вы оцените ширину луча — на расстоянии 100 *м* она равна 1 *м*. Нужно помнить, что Солнце движется по небесному своду, поэтому лучше проделать этот опыт около полудня, так как тогда отраженный луч будет оставаться в горизонтальной плоскости и вам не придется менять установку зеркала.

Расстояние, с которого остается видимым такое маленькое пятно света, удивительно велико.

Зеркало размером 5×5 *см* можно видеть на расстоянии 13 *км*, а обычное карманное зеркало иногда можно видеть и на расстоянии 30 *км*. В Америке спасательные средства кораблей всегда снабжаются зеркалом **).

Рис. 13 показывает нам простейший способ придания световому пучку нужного направления. Для этого нужно соскоблить покрытие зеркала с обратной стороны и прицелиться через образовавшееся отверстие и поверх края установленной на определенном от вас расстоянии дощечки на избранную вами цель. Наклоняйте зеркало до тех пор, пока отраженный пучок солнечного света не будет бросать на дощечку световое пятно, которое будет краем доски рассечено пополам.

Гаусс, проводя триангуляцию, получал таким путем очень четко очерченные источники света, которые можно было наблюдать через

*) R a m s a u e r, Ann. d. Phis. **84**, 730, 1927.
**) J. Optic. Soc. Amer. **36**, 110, 1946.

зрительные трубы измерительных инструментов на расстоянии 100 *км*. Такой «гелиотроп» снабжен специальным аппаратом для

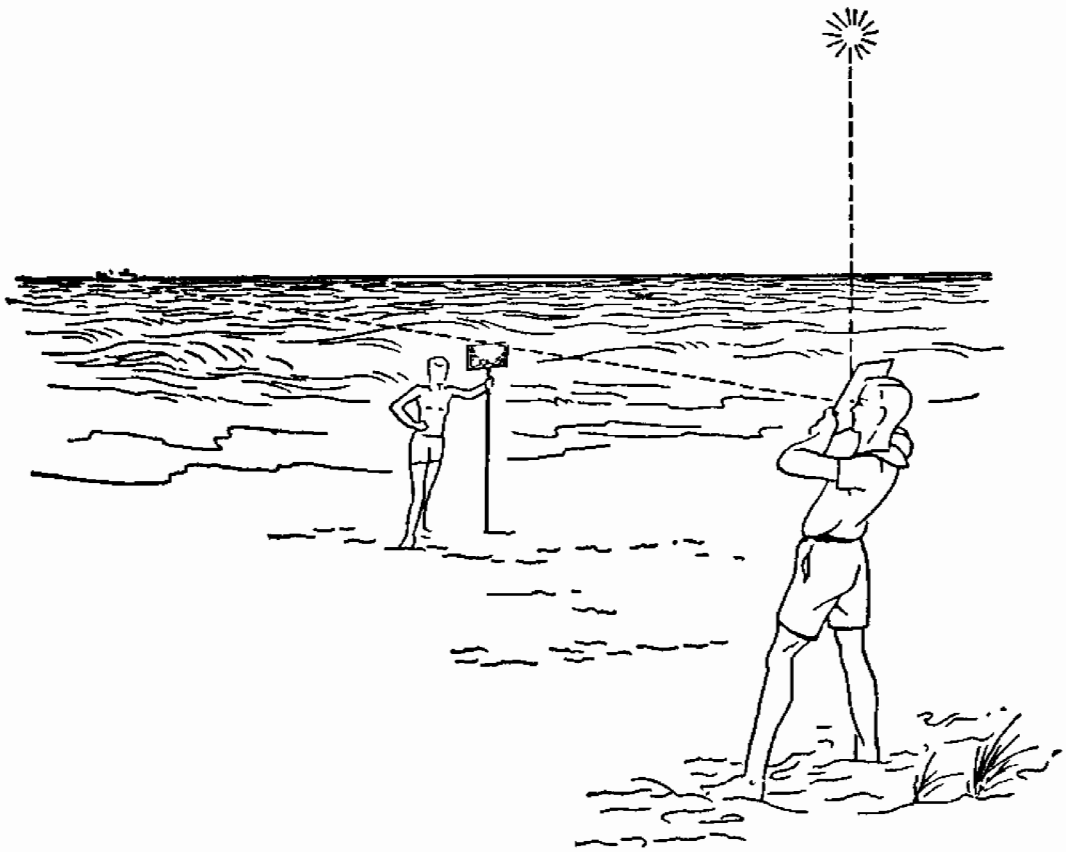


Рис. 13. Как сигнализировать с помощью зеркала.

направления луча по желанию наблюдателя. Прикрывая и открывая источник света, можно передавать сигналы азбукой Морзе.

## 12. Отражение в садовом зеркальном шаре

В школе всегда изучают выпуклые зеркала, но эти зеркала невелики по размерам и их кривизна мала. На зеркальном шаре, какие мы иногда видим в садах, они соответствуют небольшому кусочку (отмечен жирной линией), который повернут к нам и в котором мы можем видеть собственное отражение (рис. 14).

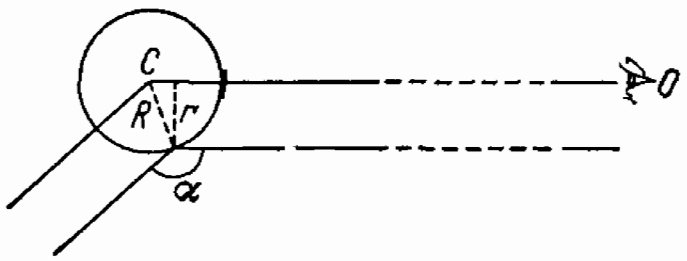



Рис. 14. Весь мир отражается в небольшом зеркальном шаре.

Но зеркальный шар предоставляет нам гораздо больше возможностей. Самое замечательное, что мы можем видеть в нем всю поверхность небесной сферы (правильнее сказать,— и небо, и землю), заключенной внутри круга. Зеркальный шар действует как оптический инструмент с идеально большой апертурой. Конечно, это возможно лишь постольку, поскольку все изображения деформируются: они сжаты по радиусу тем больше, чем ближе расположены

к «краю» шара (см. рис. 14). Для простоты предположим, что как наблюдаемый объект, так и наблюдатель находятся от шара на значительном (по сравнению с радиусом шара $R$) расстоянии; тогда объект в направлении, составляющем угол $\alpha$ с $CO$, будет изображаться на расстоянии $r = R\sin\frac{\alpha}{2}$ от центра шара. Видно, что по мере возрастания $\alpha$ до 180° $r$ увеличивается до $R$ и, таким образом, все на земле, а также и небо, фактически отражается в шаре. В отражении отсутствует только небольшое пространство, расположенное точно за шаром, которое становится тем меньше, чем дальше от шара мы находимся.

Гельмгольц однажды заметил, что ландшафт, искаженный шаром, должен был бы казаться совершенно нормальным, если бы линейная мера, которой мы пользуемся, была деформирована по тому же закону. Это утверждение тесно связано с принципами теории относительности.

Садовый зеркальный шар может быть использован для очень тонких наблюдений в области метеорологической оптики, так как в нем хорошо видна значительная часть неба *). Если вы станете в нескольких метрах от шара таким образом, чтобы отражение Солнца было закрыто вашей головой, вы с поразительной четкостью увидите (см. ниже):

а) кольца, гало, радужные облака, кольцо Бишопа, сумеречные тени; особенно резко различается в садовом шаре вид неба в день с чистым воздухом и в день, когда воздух мутен;

б) пятна Гайдингера и поляризацию света неба.

В связи с уменьшением изображения постепенное изменение оттенков выступает резче, так что разница в яркости и цвете становится гораздо заметнее для глаза.

На сверкающей поверхности велосипедиого звонка часто можно увидеть легкие облака, которые при прямом наблюдении неба не заметны.

## 13. Отражение в мыльных пузырях

Бойс **), который провел столько прекрасных опытов на мыльной пене, советует выдувать мыльные пузыри на свежем воздухе. Для этого необходимо выбрать безветренный день и хорошо защищенное от движения воздуха место. В таких условиях удается наблюдать отражения на тонкой сферической поверхности во всей их прелести.

---

*) A. Hoffmann, Das Wetter **34**, 133, 1917; Fr. Volz, Photographische Wissenschaft **3**, 3, 1954.

**) См. Ч. Бойс, Мыльные пузыри, М.—Л., 1936.

Обращенная в нашу сторону половина шара представляет собой выпуклое зеркало и дает такие же прямые изображения, как садовый шар. Чем ближе изображения к краям пузыря, тем больше они сжимаются и искривляются.

Одновременно мы видим сквозь стенку мыльного пузыря его заднюю сторону, которая представляет собой вогнутое зеркало. Мы тут же замечаем, что изображения на ней перевернуты. Прямые и перевернутые изображения будут одинаковой величины, но они не накладываются друг на друга, поскольку первое изображение расположено ближе к нашему глазу, чем второе.

Прямое изображение будет расположено на расстоянии $r/2$ перед центром пузыря, а перевернутое — на расстоянии $r/2$ позади него.

Интересно наблюдать за:

1) двойным отображением ясного неба;

2) силуэтом своей же головы, которая обозначается темной на светлом фоне;

3) значительно деформированной линией крыш домов;

4) увеличенным изображением своей же руки, которая держит трубку с мыльным пузырем на ее конце (особенно хорошо это заметно на вогнутой стороне шара);

5) отображением на вогнутой части пузыря конца трубки, на которой повис сам пузырь.

Особое наслаждение доставляет созерцание переливающейся игры радужных цветов, которая из-за смены многочисленных оттенков становится все богаче и богаче... до тех пор, пока не лопнет шар. Эта игра цветов возникает благодаря интерференции (цвета Ньютона) (§ 172).

Попытайтесь сфотографировать мыльный пузырь и отражения в нем!

## 14. Неправильности на поверхности воды

Вообразите лужицу воды во впадине среди дюн, куда не попадает ветер, который мог бы всколыхнуть воду. То там, то здесь из воды высовывается стебелек травы или тростника. Обратите внимание на интересное явление: каждый стебелек окружен пятном света именно в том месте, где он высовывается из воды. Стебелек действует как капилляр, поверхностное натяжение воды заставляет ее подниматься вокруг основания стебля. Образовавшийся водяной холмик отражает свет, и его можно увидеть с большого расстояния. Если одна часть лужи отражает темный склон дюн, а другая — яркое небо, то около границы этих двух частей можно увидеть, как все маленькие холмики отражают сочетание темного и светлого в зависимости от направления, по которому мы смотрим.

Подобным же образом повсюду, где в реке есть хотя бы малейшее течение, можно увидеть маленькие водовороты. Внутри каждого водоворота давление несколько слабее и на поверхности образуется небольшое углубление. Диаметр такой впадины равен примерно 4 *см*, а глубина — нескольким миллиметрам. Поблизости от границы между темными и светлыми отражениями на поверхности воды совершенно отчетливо видны даже самые слабые возмущения. Часто явственно различается сетка струй.

Только что прошел дождь. В трамвайных рельсах вода, и вот мы видим, что в ней отражается в горизонтальном направлении какая-то поперечная линия. Это — проволока, поддерживающая трамвайный провод. Посмотрев вдоль рельса, мы увидим, что изображение окажется симметрично искаженным (рис. 15, *а*). Это ясно показывает, что поверхность воды изогнута и образует капиллярный мениск. Если мы встанем слева от рельса, изображение деформируется как на рис. 15, *б*, а если мы сдвинемся вправо, то это будет соответствовать рис. 15, *в*. Подумайте, почему отражение приобретает именно эту форму?

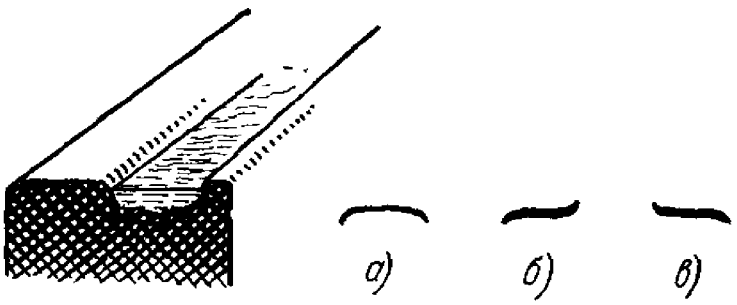



Рис. 15. Дождевая вода в трамвайном рельсе сбразует изогнутое зеркало.

Отражения от изогнутой поверхности жидкости можно наблюдать с парохода, глядя на волны, движущиеся вместе с пароходом. Но нужно стоять на одном и том же месте и смотреть в одном и том же направлении. Следует обратить особое внимание на то, как изменяются очертания отражений на первой волне у носа парохода *). Отражения сильно сжаты; они либо прямые, либо перевернутые, в зависимости от того, смотрите ли вы на вогнутую или выпуклую часть поверхности.

## 15. Оконное и зеркальное стекла

По отражению в окнах домов вы можете сразу же решить, какое в них стекло: обычное или зеркальное. Если в окно вставлено зеркальное стекло, то отражения сравнительно правильные, если же стекло обычное, то они настолько неправильны, что сразу заметны неровности поверхности стекла.

Интересно, насколько различен внешний вид домов в бедных и богатых кварталах. Среди домов богачей, в окна которых вставлены зеркальные стекла, вы сразу отличите дом с простыми оконными стеклами. Мы легко заметим, что два оконных зеркальных стекла,

*) F. A. Forel, Le Léman, II, Lausanne, 1895.

помещающиеся рядом, не находятся точно в одной плоскости, так как отражения края крыши в них смещены по отношению друг к другу. Мы также сразу замечаем, что в одном хорошем зеркальном стекле есть небольшой порок, а поверхность другого не совсем плоская.

## 16. Дорожное зеркало

На опасных поворотах пресжих дорог часто устанавливают зеркала, которые бывают, как правило, плохого качества. Вечером можно видеть, как в этих зеркалах отражения уличных фонарей смещаются, двоятся и удлиняются. Но удивительно, что вблизи таксе зеркало не кажется таким уж плохим.

Присмотритесь к нему вблизи и издалека. Выше (§ 12) мы уже отмечали, что наблюдатель видит отражение предмета в маленьком куске зеркала, если он находится непосредственно около него, и в большом куске зеркала — если вдалеке. Чем больше «работающий» участок зеркала, тем больше отклонение его от плоскости. Небольшой расчет дает нам более полную картину (рис. 16).

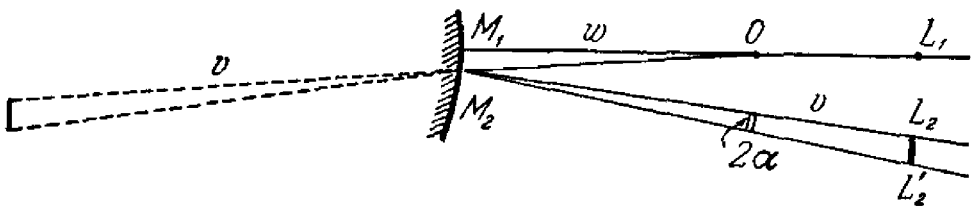



Рис. 16. Деформация изображения в плохом зеркале.

Наблюдатель $O$ на расстоянии $w$ от плоского зеркала видит предмет $L_1$, который находится на расстоянии $v$ от зеркала, отраженный участком поверхности $M_1$. Предмет $L_2$ отражается соседним участком поверхности $M_2$. Если же зеркало не совсем плоско и перпендикуляры к поверхности зеркала в точках $M_1$ и $M_2$ пересекаются под углом $\alpha$, то световой луч отклоняется на угол $2\alpha$, и предмет кажется смещенным на расстояние $L_2L_2' = 2\alpha v$.

Но наблюдателю кажется, что он видит отраженный объект на расстоянии $v$ позади зеркала, так что предмет удаляется от его глаза на расстояние $v + w$. Значит, он воспринимает смещение предмета, как смещение на угол $2\alpha \frac{v}{v+w}$. При этом надо еще иметь в виду, что угол $\alpha$ возрастает примерно пропорционально расстоянию $M_1M_2$, так что при данном расстоянии $L_1L_2$ этот угол будет пропорционален $\frac{w}{v+w}$ и смещение пропорционально $\frac{vw}{(v+w)^2}$.

Если, например, $v = 10$ *м*, тогда при

| $w$ | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 10 *м* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Деформация: | 0 | 0,5 | 0,8 | 1,4 | 1,7 | 2,5 |

(в произвольных единицах).

## 17. Неправильное отражение на воде, покрытой легкой рябью *)

Длинные дорожки света на поверхности воды неотделимы для меня от ощущения спокойного вечера. Я вижу Луну, отраженную в море и отбрасывающую широкую полосу света. Или я вспоминаю дома и башни древнего Брюгге, отраженные в спокойных каналах, причем каждое пятнышко света, каждая цветная полоса — все вытянуто по вертикали, и эти полосы, длинные и короткие, колышутся, делаясь то ярче, то темней, сверкая и угасая.

Интересно, что мы находим в отражении только вертикальные линии. Труба или тонкая высокая мачта отражаются очень отчетливо, но четкая линия крыш при этом исчезает. Вертикальные стволы деревьев отражаются весьма резко, но стволы деревьев, которые имеют хоть небольшой наклон, отражаются не так отчетливо, а их горизонтальные ветви совсем исчезают. Стройная шея лебедя отражается яркой полоской света, а туловище птицы теряется в движении воды.

Элементарное явление такого рода мы увидим, наблюдая вечером за уличными фонарями.

Отраженный ландшафт мы можем считать совокупностью световых точек, каждая из которых при отражении вытягивается в вертикальный столбик. Если линии ландшафта вертикальны, эти столбики перекрываются и усиливают друг друга; если горизонтальны, они лежат друг возле друга и расширяют линию.

Основное, что требует объяснения — это тот факт, что одна точка света вытягивается в длинную световую дорожку, направленную к нашему глазу, в то время как сами волны разбросаны по поверхности абсолютно неправильно и возникают одинаково часто во всех направлениях.

Видя отражение Луны или лампы на покрытой легкой рябью воде где-либо неподалеку от нас, мы замечаем, что в действительности каждая маленькая волна дает отдельное изображение. Все освещенные волны вместе образуют одну фигуру, представляющую собой продолговатое пятно, длинная ось которого лежит в вертикальной плоскости, проходящей через глаз и источник света.

Чтобы понять, каким образом появляется световая дорожка, начнем с простого опыта (рис. 17).

Сядьте к столу, положите на стол зеркало $M$ так, чтобы лучи лампы $L$ после отражения попадали в ваш глаз. Теперь положите

---

*) См. в особенности: J. Picard, Arch. sc. phys. et nat. **21**, 481, 1889; G. Galle, Ann. d. Phys. **49**, 255, 1840, A. Wigand und E. Everling, Phys. Zs. **14**, 1156, 1913; Meteor. Zs. **31**, 150, 1914; E. O. Hulburt, J. Optic. Soc. Amer. **24**, 35, 1934, W. Shoulejkin, Nature **114**, 498, 1924; K. Stuchtey, Ann. d. Phys. **59**, 33, 1919; Van Wieringen, Proc. Acad Amsterdam **50**, 952, 1947, J. Le Grand, Bull. Instit. Océanograph. Monaco, № 1002, 1952.

под зеркало кусочек картона так, чтобы оно получило наклон в вашу сторону. Вы увидите, что зеркало отражает теперь предметы, находящиеся выше лампы. Если вы хотите, чтобы в глаз падал луч из точки $L$, вам будет нужно сдвинуть зеркало до точки $N$. Подложим теперь картон с другой стороны, чтобы зеркало было наклонено в противоположном от нас направлении и передвинем зеркало в

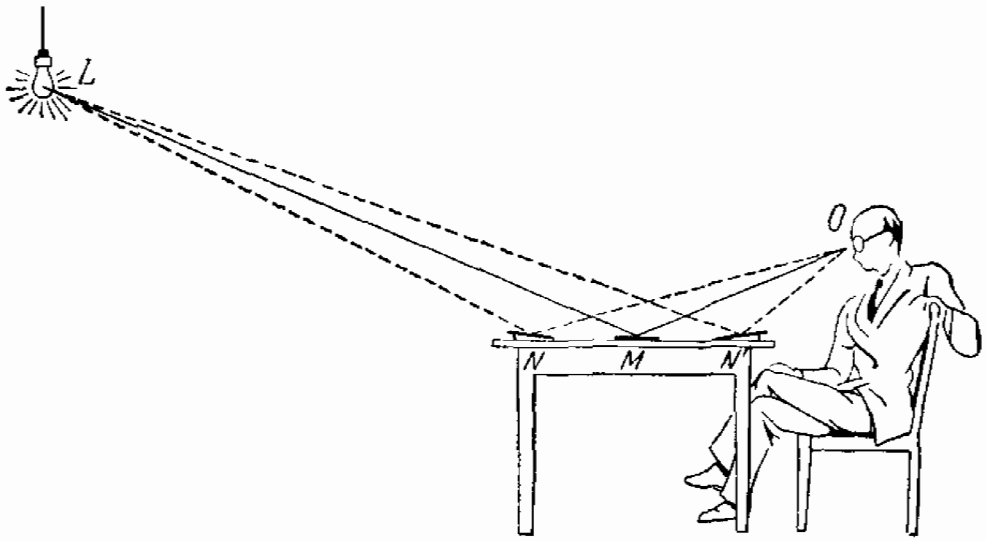



Рис. 17. Как образуется пятно отраженного света.

точку $N'$. Зеркало в этих двух наклонных положениях будет представлять крайние положения волн, при которых отраженный от них свет еще будет попадать в наш глаз. Расстояние между $N$ и $N'$ будет поэтому являться длиной световой дорожки. Во всех точках между $N$ и $N'$ найдутся участки волн такого рода, которые будут иметь достаточный наклон для того, чтобы отражать лучи в направлении к нашему глазу. Чем больше будет этих пятен, тем ярче будет световая дорожка в данной точке.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы с помощью теории вероятностей рассчитать среднее распределение интенсивности света по такой дорожке. Это довольно сложная история *)! Несколько упростив задачу, мы примем, что крутизна склона волны не превышает некоторого угла $\alpha$, и постараемся найти только границы полосы света. Мы сформулируем свою задачу так: если в каждом месте поверхности имеется большое число маленьких зеркальных волн, имеющих одинаковую крутизну склона $\alpha$, но различное направление, то каковы тогда будут границы освещенной полосы? И даже если упростить задачу до такой степени, ответ будет достаточно сложен.

1. Простейший случай: $h - h'$; наблюдатель и источник света находятся на одном уровне над поверхностью воды (рис. 18).

Маленькое горизонтальное зеркало отбрасывает свет в глаз наблюдателя $O$, когда оно находится как раз посередине, у места обычного отражения $M$. Зеркало,

*) См. Cox and Munk, J. Optic. Soc. Amer. **44**, 838, 1954; Scripps Inst. of Oceanography, №№ 731 и 737.

наклоненное под углом $\alpha$, должно быть немного смещено от середины, чтобы оно отбрасывало свет к наблюдателю. Чему же равно это расстояние? Если смещение будет происходить в вертикальной плоскости, проходящей через глаз и источник

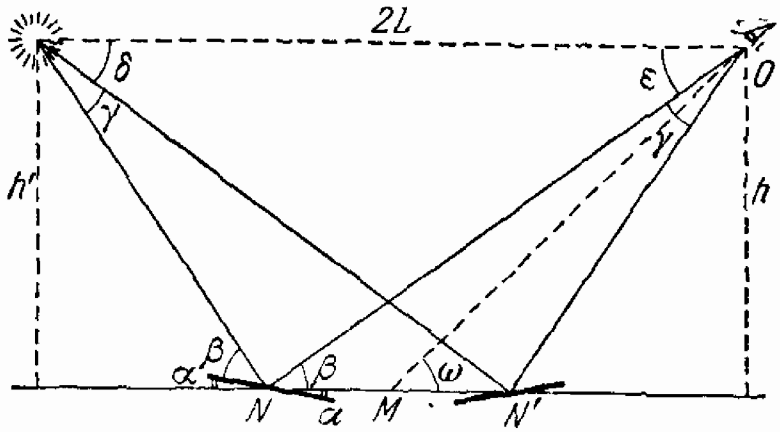



Рис. 18. Как вычисляется длинная ось пятна отраженного света.

света, на вопрос ответить легко. Пусть $N$ — положение зеркала, смещенного в одном направлении, и $N'$ — в другом. Вследствие симметрии $MN=MN'$. Теперь рассмотрим углы между лучами света; очевидно,

$$\beta+\alpha=\gamma+\delta,$$
$$\beta-\alpha=\varepsilon=\delta.$$

Отсюда

$$\gamma=\alpha+\beta-(\beta-\alpha)=2\alpha.$$

Угол, под которым мы видим наибольшую ось светового пятна, равен углу между двумя наиболее крутыми склонами волн (рис. 19).

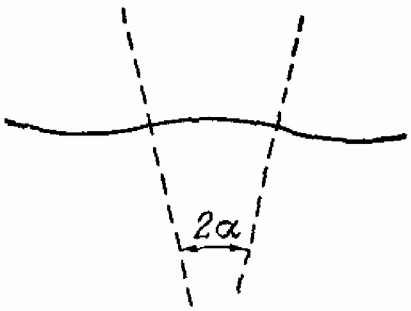



Рис. 19. Угол между склонами волн.

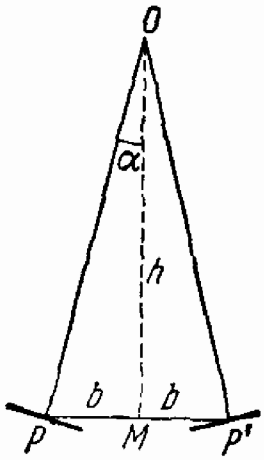



Рис. 20. Как вычисляется короткая ось пятна отраженного света.

Передвинем наше зеркало в плоскости, проходящей через $M$, перпендикулярно к прямой, соединяющей глаз с источником света, и обозначим $P$ и $P'$ точки, где появляются удовлетворительные отражения (рис. 20). Очевидно, $MP=MP'=h\operatorname{tg}\alpha$. Таким образом, ширина полосы света равна $2b=2h\operatorname{tg}\alpha$, а короткая ось стягивает угол $\dfrac{PP'}{OM}=\dfrac{2h\operatorname{tg}\alpha}{\sqrt{l^2+h^2}}$.

Отношение двух видимых полуосей пятна света поэтому равно: $\frac{h\,\mathrm{tg}\alpha}{a\sqrt{h^2+l^2}}$ или примерно $\frac{h}{\sqrt{h^2+l^2}}=\sin\omega$, если пятно света не слишком велико. Поэтому, если мы посмотрим на воду с холма, то окажется, что пятно лишь слегка продолговато ($\omega$ велико, $\sin\omega$ близок к 1). Чем меньше угол, под которым мы смотрим на воду, тем более продолговато пятно. Если наш взгляд будет скользить по поверхности, то пятно будет до бесконечности суживаться.

Мы всегда должны различать «первичный овал», т. е. воображаемую кривую на покрытой рябью воде, которая как бы ограничивает пятно света, от «вторичного овала», который возникает из первого, когда он проектируется на плоскость, перпендикулярную к нашему взгляду. Оси первого овала высчитать очень легко, но вся фигура представляет собой сложную кривую шестого порядка, симметричную по отношению к $M$. Вторичный овал становится слегка асимметричным, он имеет наибольшую ширину не в точке $M$, где мы намечали пересечение осей, а ближе к нам. Эта асимметрия особенно хорошо заметна, когда мы смотрим под небольшим углом к поверхности воды.

2. Общий случай: $h\neq h'$ (рис. 21).

Подобными же рассуждениями мы можем доказать два основных свойства:

$$u+v'=2\alpha,$$
$$u'+v=2\alpha,$$
$$u+v+u'+v'=\gamma+\gamma'=4\alpha.$$

Дальнейшие вычисления показывают, что пятно остается более или менее эллиптическим по очертаниям, но результат оказывается довольно сложным.

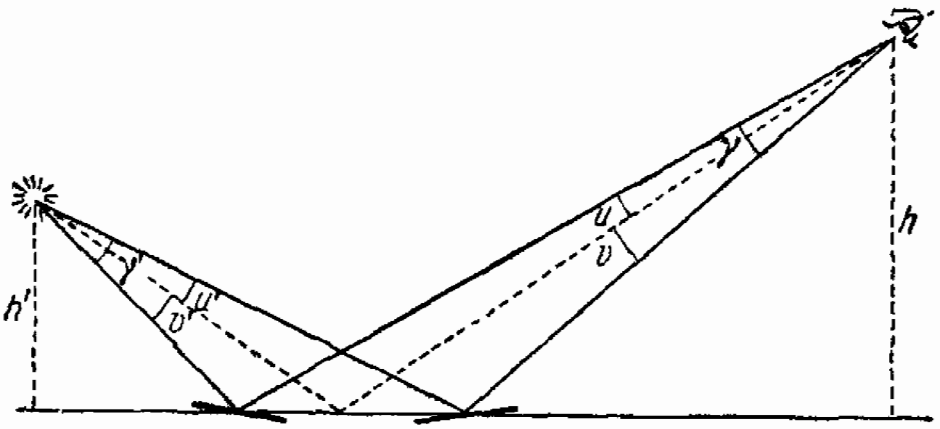



Рис. 21. Наблюдение пятна света с высоты, отличающейся от высоты источника света.

Практически разница в высоте между $h$ и $h'$ влияет лишь на уменьшение пятна света, но не на его форму; приближению

$$\frac{\gamma}{\gamma'}=\frac{h'}{h},$$

так что

$$\gamma=4\alpha\,\frac{h'}{h+h'}.$$

3. Особый случай: $h'=\infty$. Это — случай отражения Солнца, Луны и очень высоких фонарей.

Теперь формулы таковы: $\gamma=4\alpha$; $PP'=2h\mathrm{tg}2\alpha$ (как это может быть доказано). Оси овала сгягивают углы приблизительно $4\alpha$ и $4\alpha\sin\omega$. Отношение видимой длины

к ширине светового пятна, таким образом, равно sin ω, т. е. такое же, как и в случае 1, лишь все размеры в два раза больше.

Понятие о том, каким образом распределяется свет в этих отражениях, может быть получено без особых вычислений следующим путем (рис. 22). Представьте себе отражающую поверхность очень небольших размеров, расположенную вблизи центра большой сферы. Перпендикуляр к спокойной поверхности воды проходит через точку $N$; перпендикуляры к склонам волн (с углом наклона $\alpha$) заключены в малом круге углового радиуса $\alpha$ с центром в $N$. Источник света в бесконечности представлен на сфере точкой $L$; его отражение на сфере попадает в точку $N'$. Чтобы найти, как отражает лучи поверхность, перпендикулярная к $OS$, достаточно провести дугу большого круга $LS$ и продолжить ее до $S'$ так, чтобы $SS'=SL$. Таким образом, сразу видно, что лучи, отраженные всеми небольшими волнами, образуют конус с овальным поперечным сечением; овал становится более продолговатым по мере того, как уменьшается угол, под которым мы смотрим на поверхность воды. Очень легко также понять, почему конус, ограниченный направлениями взгляда наблюдателя, т. е. линиями, проведенными от глаза до границ светового пятна, имеет ту же форму.

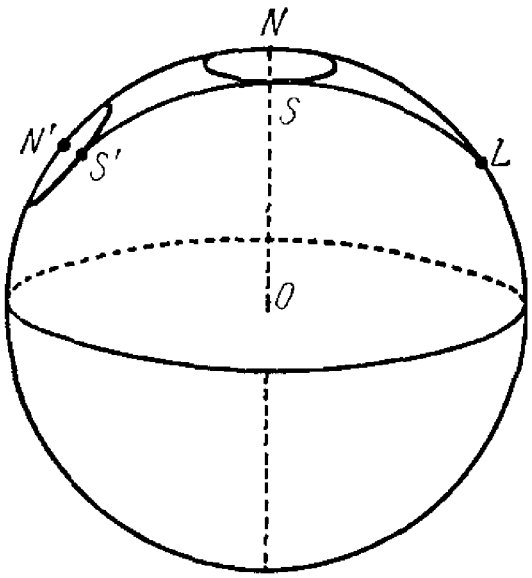



Рис. 22. Возникновение дорожек света, объясняемое при помощи построения на сфере.

Подведем итог нашим расчетам с точки зрения практического наблюдателя. Во-первых, если мы вообразим себя над поверхностью воды на той же высоте, что и источник света, то угол, соответствующий большой оси светового пятна, является в то же время углом $2\alpha$ между двумя самыми крутыми склонами волн (рис. 19). Соответственно этому поперечная ось пятна тем меньше, чем более наклонно мы смотрим на поверхность воды.

Во-вторых, если источник света находится выше над водой, чем наш глаз, размеры светового пятна (в угловой мере) увеличиваются во всех направлениях; они почти удваиваются по сравнению с их первоначальной величиной, если источник света удаляется до бесконечности. Однако отношение между большей и меньшей осями остается почти прежним.

Сравните световую дорожку от Луны с дорожкой от лампы, дающей отражение приблизительно в том же направлении. Дорожки света тем больше, чем дальше они удалены от источника света. Предметы, находящиеся вблизи от воды, дают почти точечные, не удлиненные, отражения. Сравните различные световые дорожки, рассматриваемые под разными углами по отношению к поверхности воды. Определите угол $2\alpha$ из длины световых пятен (в угловом измерении) при различной силе ветра.

Обратите внимание на то, как красивы длинные правильные вертикальные дорожки света при дожде: волны, хотя и небольшие, имеют очень крутые склоны.

Сравните световые дорожки от Солнца и от Луны при одинаковых условиях: из-за значительно большей силы света солнечная дорожка ярче; отдельные очень крутые склоны выделяются отчетливее, и этого достаточно, чтобы глаз переносил границу дальше от наблюдателя.

## 18. Подробное изучение световых столбов

Интересно также проследить формы отражений на каждой отдельной волне. На каждой из них есть пятно света, вытянутое в горизонтальном направлении, причем пятно вытягивается, превращаясь в небольшую линию, по мере склонения Солнца к горизонту, и все эти небольшие световые полосы вместе образуют вертикальный столб (рис. 23, слева).

На расположенном ближе к нам конце светового столба мы можем ясно увидеть, как дорожка света удлиняется или укорачивается в зависимости от того, как группируются волны на воде, в то время как на другом отдаленном конце световые пятнышки постепенно сливаются.

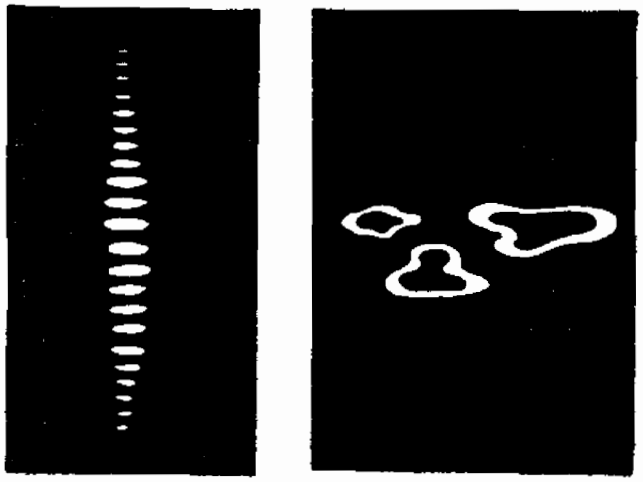


Рис. 23. Слева — пятно света на слегка волнующейся воде; справа — отражение от высокого источника света.

Очень интересно появление замкнутых световых колец, когда источник света находится высоко над водой и имеет большую поверхность (например, светящиеся неоновые рекламы; рис. 23, справа).

С этими отражениями связана еще одна особенность перспективы. Каждый столб лежит в вертикальной плоскости, проведенной через мой глаз и источник света (об исключениях см. § 19). Рисуя, я проектирую все, что хочу изобразить, на вертикальную плоскость перед собой, и поэтому всякое световое пятно должно вытягиваться в вертикальном направлении, даже когда оно не находится в центре изображаемой картины. На одной из картин Клода во Флоренции Солнце помещается очень близко к краю полотна. Художник изобразил столб света, который падает наклонно от Солнца на середину переднего плана. Но это ошибка *).

Наведите ваш фотоаппарат на море, освещенное Солнцем, и понаблюдайте на матовом стекле распределение света, отраженного от волн; отсюда можно высчитать наклон волны и их преобладающее направление; один раз взглянув на воду, можно уже получить общее впечатление от поверхности воды и все это можно зафиксировать на фотографической пластинке **).

---

*) Ruskin, Modern Painters, I, Pt. II.

**) См. работы Шулейкина и Ле Гранда, упомянутые в примечании к § 17 (стр. 36). Другие исследования, проведенные сходным методом: Cox and Munk, J. Optic. Soc. Amer. **44**, 838, 1954; Scripps Inst. of Oceanography, New Series, 731.

## 19. Отражение от полосы воды, покрытой рябью

Дорожки света часто бывают асимметричны: когда, стоя у канала, смотришь на фонарь на противоположной стороне, находящийся, скажем, правее, то световой столб уже не лежит в вертикальной плоскости, проходящей через глаз наблюдателя и источник света; он отклоняется, приближаясь к направлению канала (рис. 24).

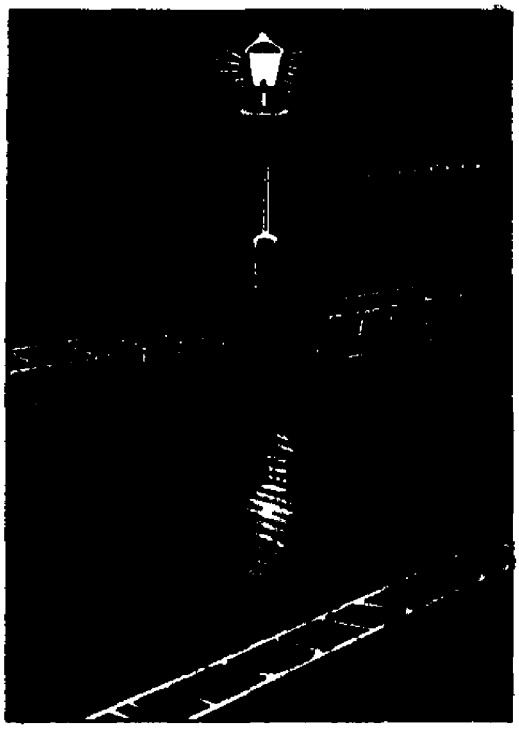


Рис. 24. Странная картина! Отражение ие лежит в вертикальной плоскости, в которой находятся глаз и источник света.

Все же теория наша была верна. Когда идет дождь и нет ветра, пятна света абсолютно вертикальны, в каком бы направлении вы ни смотрели.

Причина описанных выше отклонений — ветер, дующий вдоль канала и вызывающий поперечнсе волнение (рис. 25).

Таким образом, здесь мы уже не можем полагаться на идеально неправильное образование волн. Для доказательства служат такие наблюдения:

1. На поверхности широкой реки отклонение световых столбов гораздо менее систематично; волны не имеют преобладающего направления под прямым углом к берегу.

2. Когда вода покрыта льдом, в слое льда есть множество мелких кусочков, отражающих свет; при этом отражение очень четкое и вертикальное.

3. На мокрой после дождя асфальтовой дороге можно наблюдать те же самые отклонения, что и на канале в ветреный день, если рассматривать на мокрой поверхности отражения уличных фонарей, а также отражения света автомобильных и велосипедных фар. Оказывается, что эти неровности вызваны уличным движением (как они возникают — само по себе очень интересное явление!). Внимательно глядя на поверхность дороги, мы сразу заметим неровности, похожие на настоящие волны с гребнями, расположенные под прямым углом к направлению дороги.

Детальный разбор этого явления еще не сделан, но при помощи проектирования на сферу, упомянутого выше, можно представить себе его основные черты, по крайней мере для случая бесконечно далекого источника света (см. рис. 22, стр. 40). Если перпендикуля-

ры к поверхности располагаются по дуге $NS$, то отраженные лучи будут направлены к различным точкам сферы, расположенным по

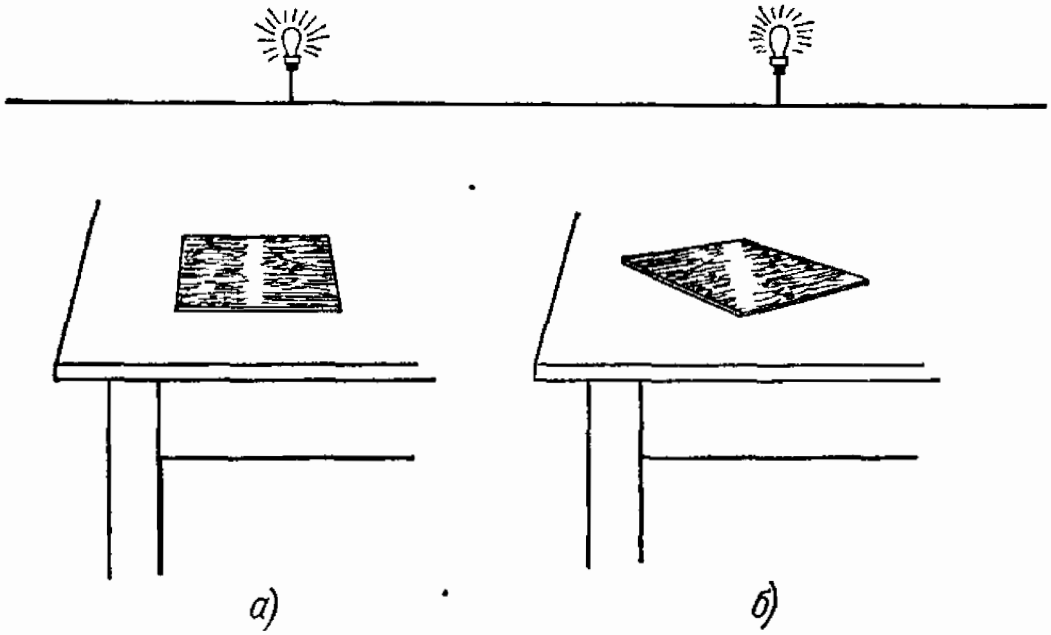



Рис. 25. Как возникают наклоненные пятна света, когда волны имеют определенное направление: *а*) полосы на доске, изображающие гряды волн, перпендикулярны направлению источник света — глаз; *б*) полосы расположены под углом к этому направлению.

дуге $N'S'$; ось световой дорожки не лежит больше в плоскости $LNN'$, но смещается в сторону *).

## 20. Отражение от большой водной поверхности, покрытой волнами (фотография II) **)

Отражение от волнующегося моря всегда сопровождается явлением, которое мы назовем *смещением отражения к горизонту* (рис. 26). Отражение $A'B'$ границы $AB$ между облаком и голубым небом гораздо ближе к горизонту, чем сама граница на небе ***). Ближайшие к горизонту 25 или 35 градусов в действительности едва ли будут видны в отражении. Все изображения, конечно, будут неравномерно искажены, но действие этого явления настолько сильно, что заметно влияет даже на общее распределение света по всей видимой поверхности моря. Этим можно объяснить тот факт, что деревья на берегу, дюны и т. п. никогда не отражаются в море, так как они недостаточно высоки. По той же причине мы почти никогда не увидим отражения корабля, так как темное пятно, которое должно было образоваться, как бы придвигается к самому кораблю.

*) M i n n a e r t, Physica **9**, 925, 1942; van W i e r i n g e n, Proc. Acad. Amsterdam **50**, 952, 1947.

**) E. O. H u l b u r t, J. Optic. Soc. Amer. **24**, 35, 1934; Ш у л е й к и н, Физика моря (М., 1941).

***) См. картины Айвазовского в Русском музее (Ленинград): «Морское побережье» (1841 г.), «Этюд облаков» (1889 г.).

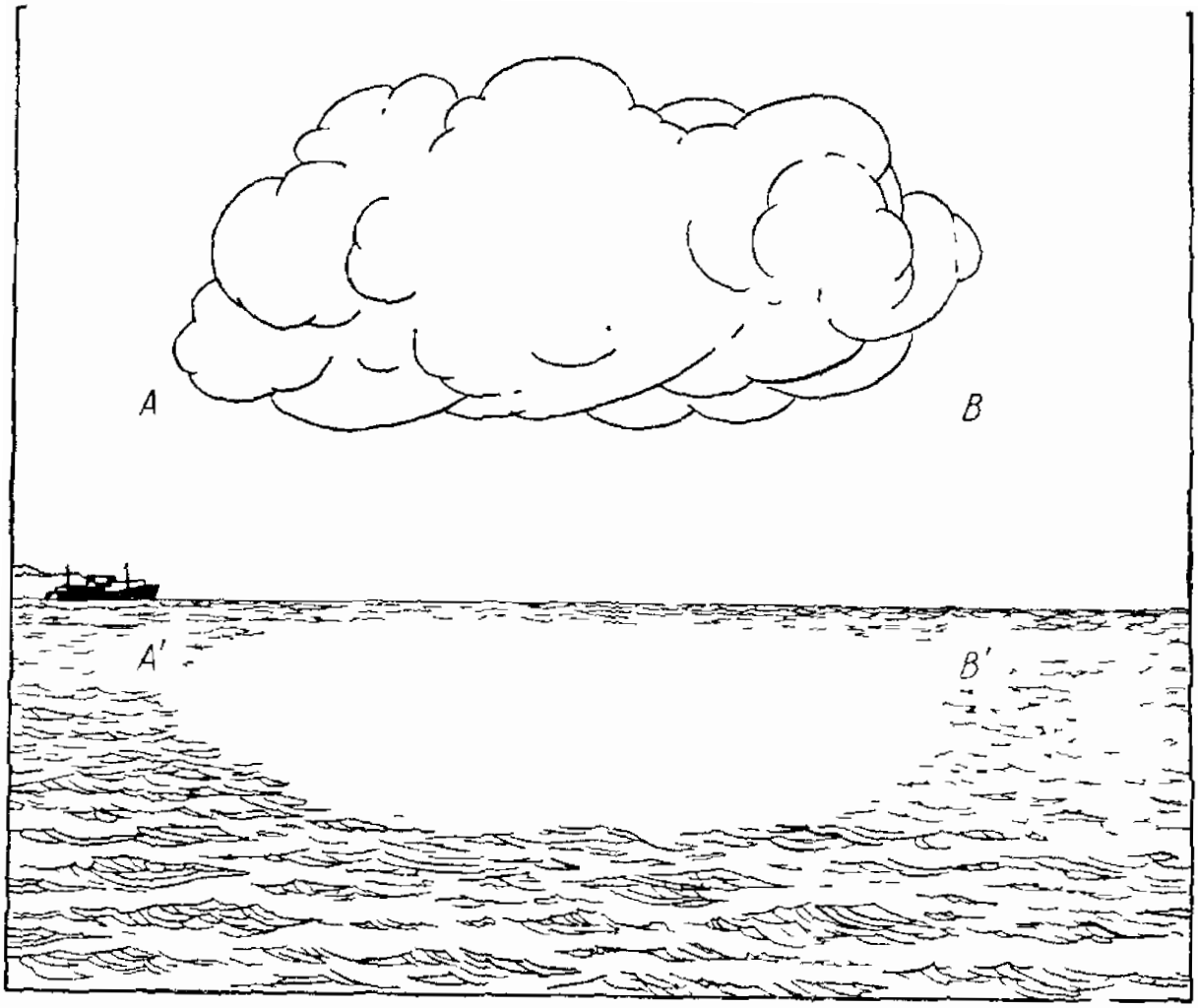



Рис. 26 Отражение на море, изображение облака смещено по направлению к горизонту.

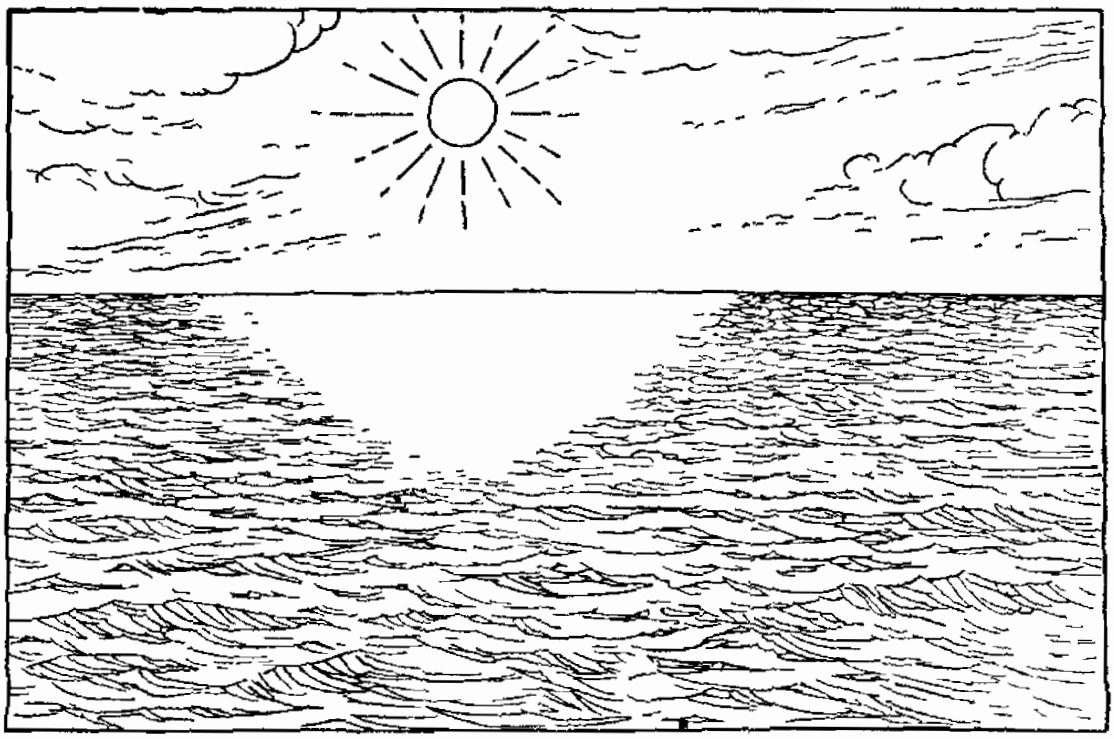


Рис. 27. Море, освещенное Солнцем.

Отражение Солнца в волнах представляет собой исключительно яркое, слепящее пятно, которое, по мере того как Солнце приближается к горизонту, становится более или менее треугольным. Это явление также указывает на смещение отражения к горизонту (рис. 27).

Смещение изображения к горизонту легко объяснить. На большом расстоянии мы видим только те стороны волн, которые обращены к нам. Поэтому все предметы как бы отражаются в наклонном зеркале (рис. 28). Следовательно, если ближайшие к воде 30° не отражаются, то наклон волн в любом направлении равен приблизительно 15° (в том случае, когда море не слишком спокойно, но и не бурно).

Рис. 28. Объяснение смещения отражения: отраженный луч проходит ближе к поверхности воды, чем падающий.

Почему мы не упомянули об этом явлении в теоретическом разделе § 17? Потому, что мы не рассматривали там случай $\omega < 2\alpha$, когда мы смотрим на поверхность воды под очень малым углом. Таким образом, явления, для которых неприемлемы наши расчеты, касаются тех случаев, когда поверхность воды чрезвычайно велика, особенно когда мы имеем дело с морем. Чем спокойнее море, тем взгляд наш должен быть более наклонным.

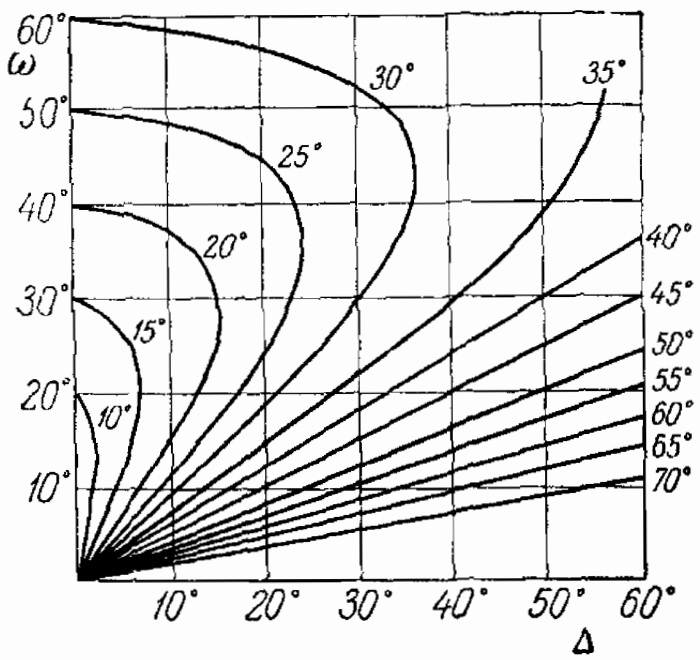



Рис. 29. Каждой паре наблюденных величин ω и Δ соответствует определенная точка. Найдите ее место относительно кривых, каждая из которых соответствует определенному значению α (J. Optic. Soc. Amer. **24**, 35, 1934).

Что это верно, можно сразу обнаружить, если понаблюдать за морем, освещенным Солнцем Световая дорожка здесь достигает горизонта, и мы уже не можем определить наклон волн из длины световой дорожки, а должны применить другой метод; если наклон волны становится круче, то на горизонте все более широкая полоса покрыта искрящимся светом (ср. фотографию II).

Измерьте угол Δ, который определяет ширину светового пятна на горизонте. Измерьте также высоту Солнца ω и отсюда высчитайте наклон волны α при помощи диаграммы (рис. 29) или при помощи формулы

Спунера, упрощенной для высот Солнца меньше 15°: $\alpha = \frac{\Delta}{2\omega}$ радианов (1 радиан = 57°).

В очень спокойном море садящееся и восходящее Солнце дает почти прямолинейное отражение, которое, сливаясь с огненным диском Солнца, образует нечто подобное букве Ω (рис. 30). Иногда при особенно спокойном море эллипсовидное изображение Солнца можно видеть даже тогда, когда Солнце стоит на 1° над горизонтом, но обычно превращение в треугольное пятно совершается очень скоро. В таких случаях начинает играть роль кривизна поверхности Земли; если бы волн совсем не было, можно было бы ясно видеть, что

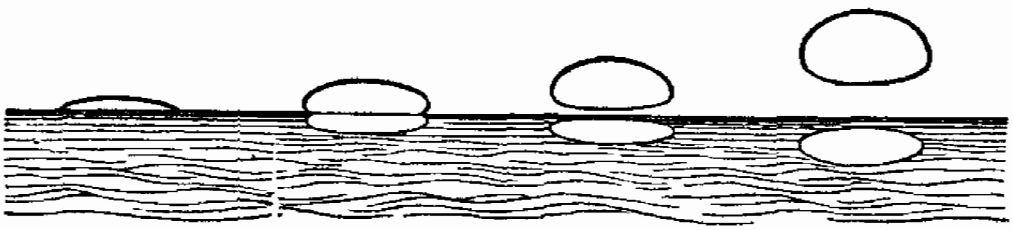


Рис. 30. Можно ли по отражению восходящего Солнца на исключительно спокойном море судить о кривизне земной поверхности?

Земля круглая. Однако во всех до сих пор изученных случаях, даже наиболее удобных для подобных наблюдений, смещение по отношению к горизонту все же остается в два раза бóльшим, чем того следовало бы ожидать при учете лишь кривизны Земли *).

## 21. Видимость очень слабого волнения

Очень маленькие волны легче рассмотреть, глядя на их гребни под прямым углом, чем если гребни будут расположены параллельно взгляду. Поэтому, чтобы увидеть, как ветер поднимает волны, на поверхность канала, как правило, нужно смотреть в направлении, параллельном самому каналу. Именно поэтому великолепные скрещивающиеся волны позади корабля хорошо видны с моста, и в то же время они практически неразличимы с берега. Это явление объясняется так же, как и превращение отражения фонаря в световую дорожку. Если вы смотрите на волны под прямым углом, вы, так сказать, видите большую ось светового пятна; если вы смотрите в параллельном направлении, то видна малая ось. Волны вызывают бóльшие отклонения на поверхности воды в направлении, перпендикулярном к их гребням.

*) A. Ricco, V. Cerulli, A. Venturi, Mem. Spettr. Ital. **17**, 203, 1888; **18**, 23, 45, 57, 1889; см. также J. Spooner, Correspon. Astron., 1 мая 1822 г., стр. 337.

## 22. Пятна света на поверхности грязной воды

Даже в том случае, когда поверхность воды гладкая как зеркало, мы часто видим вечером световые дорожки у отражений уличных фонарей. Эти световые блики не похожи на красивое мерцание света на волнах; они совершенно спокойны и неподвижны. Появляются они там, где поверхность воды загрязнена; очевидно, частицы пыли образуют много мельчайших неровностей на поверхности воды, которые оптически равносильны небольшим волнам. Можно ожидать, что световые дорожки становятся тем у́же, чем более наклонно мы смотрим на поверхность — и это действительно так.

При более или менее вертикальном падении луча эти световые пятна почти неразличимы; при скользящем падении луча пятна становятся очень заметными и явно указывают на присутствие пыли на поверхности. Такая большая разница в интенсивностях должна иметь особую причину. Частицы пыли так малы, что мы вправе говорить о *рассеянии*, а не отражении света. Мы увидим, что рассеяние на таких частицах гораздо сильнее в направлении, близком к направлению падающего луча (§ 189). Вот почему чем более наклонно мы смотрим на поверхность воды, тем ярче нам кажется пятно света.

## 23. Пятна света на снегу

Иногда поверхность снега бывает покрыта слоем отдельных снежинок — красивых маленьких плоских дисков и звездочек, более или менее горизонтальных. Если вы захотите найти на снегу отражение низко стоящего Солнца, вы заметите красивую световую дорожку, что следует приписать небольшим отклонениям некоторых «снежных пластинок» от горизонтальной плоскости. Солнце должно находиться низко над горизонтом; тогда световая дорожка су́живается и становится ярче и заметнее.

Вечером при уличном освещении образование световых пятен еще более замечательно: на свежевыпавшем снегу отражается каждый уличный фонарь!

## 24. Пятна света на дорогах

Пятна, напоминающие световые дорожки на волнующейся поверхности, появляются также и на дорогах. Особенно яркими они бывают после дождя, когда все покрыто водой и блестит. Великолепно видны эти отражения на асфальтовых шоссе, однако их можно увидеть и на булыжной мостовой и даже на дорогах, покрытых гравием. Даже и без дождя дороги наши обычно так хорошо отражают свет, что световые дорожки появляются практически всюду, если только смотреть под д о с т а т о ч н о м а л ы м у г л о м (ср. § 19).

## 25. Отражения в лужах во время дождя

Взгляните вечером во время дождя на отражение уличного фонаря в луже. Отражение окружено множеством искорок, которые появляются около того места, где падает капля дождя, причем все они выглядят как небольшие световые линии, расходящиеся от отражения (рис. 31). Форел заметил это же явление, когда через темное стекло наблюдал за отражением Солнца в спокойной воде, в которой то там, то здесь поднимались воздушные пузырьки *).

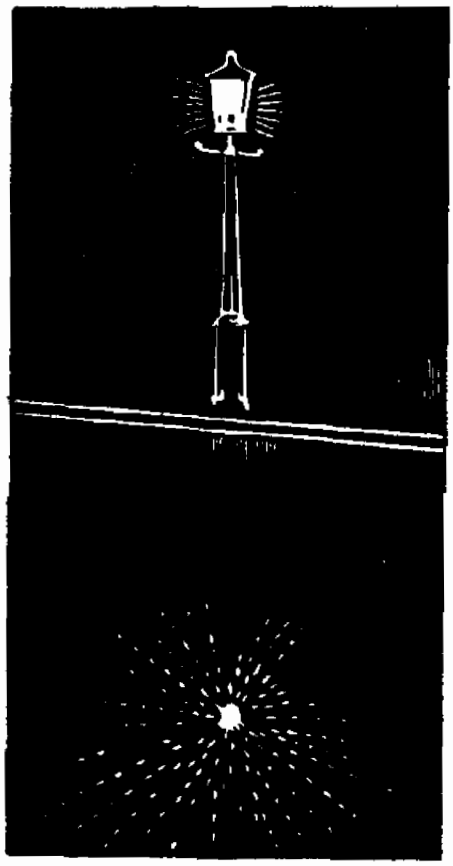


Рис. 31. Падающие дождевые капли разбрасывают во все стороны огненные искры вокруг отражения уличного фонаря.

Объяснить это очень просто. Каждая капля вызывает несколько круговых концентрических волн, и отражения от их склонов должны всегда лежать в плоскости, проходящей через центр волн и

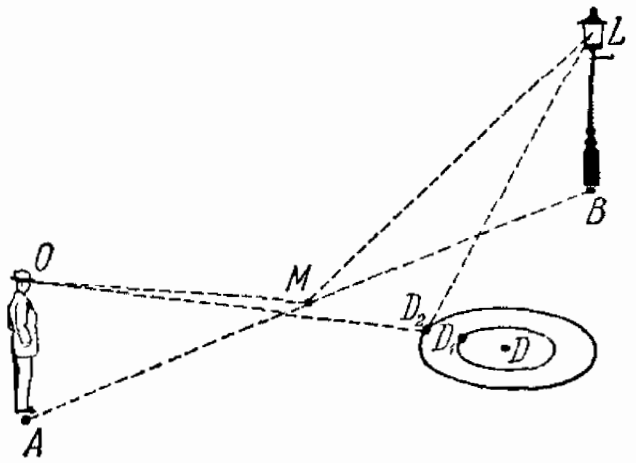



Рис. 32. Возникновение бликов вокруг изображения фонаря.

отражение источника света (рис. 32). Это хорошо заметно, если источник света $L$ и глаз $O$ находятся на равной высоте от поверхности воды и капля $D$ падает на равном расстоянии от $L$ и $O$. Точки $D_1$ и $D_2$ лежат на прямой $MD$; если круговая волна распространяется от точки $D$, отражение движется по части прямой $DM$; происходит это так быстро, что производит впечатление световой линии. Расчет показывает, что эти линии — малые дуги гиперболы **).

Явление это можно воспроизвести, если на стеклянной пластинке, в которой отражается лампа, передвигать предмет, покрытый круговыми концентрическими штрихами, например, патефонную пластинку.

*) Le Léman, II, 507.
**) M. Minnaert, Physica **9**, 1942.

## 26. Световые круги в ветвях деревьев *)

Когда позади дерева находится зажженный уличный фонарь, ночью видно, что свет отражается некоторыми ветвями; эти светящиеся пятна в действительности представляют собой более или менее длинные световые полосы, располагающиеся концентрически вокруг источника света (фотографии III и IV).

В том случае, если фонарь горит совсем близко от дерева, лучше всего смотреть, стоя в тени ствола. Однако то же явление можно наблюдать при солнечном освещении, особенно после дождя, когда блестящие мокрые сучки образуют нежный узор из качающихся

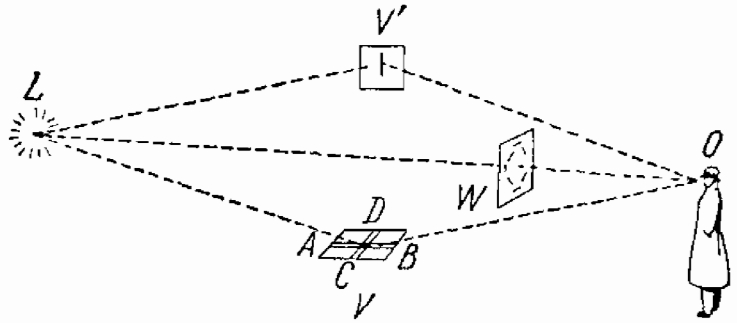



Рис. 33. Возникновение световых кругов в кроне дерева.

световых полос на темном фоне. Чтобы предохранить себя от слепящего света Солнца, наблюдателю следует укрыться в тени стены или крыши. Исключительно красивы также сверкающие обледеневшие ветки.

Все это объясняется следующим образом (рис. 33). Представьте себе небольшой участок плоскости $V$, отражающий свет фонаря по направлению к нашему глазу. Мы увидим, что все ветви в этой плоскости сверкают. Но вследствие перспективного искажения ветви, расположенные по направлению $AB$, мы увидим в значительной мере укороченными, в то время как ветви, расположенные вдоль $CD$, видны в их натуральную величину. Ветви, находящиеся около $V$, но перпендикулярные $AB$ и $CD$, не содержат ни одного горизонтального плоскостного элемента и не могут отражать лучи источника света по направлению к нашему глазу. Поскольку во всех направлениях имеется множество ветвей, мы в основном будем видеть световые линии $CD$ под прямыми углами к плоскости $OLV$. Подобное же утверждение справедливо по отношению к другим малым участкам плоскости, таким, как $V'$, которые мы видим над источником света вправо или влево от него; таким образом создается впечатление концентрических кругов. Легко заметить, что роль направления подчеркивается тем больше, чем меньше угол между нашим взглядом и

*) Fokker, Physica 2, 238, 1922; Neuberger, Meteor. Zs. 55, 68, 1938.

прямой *OL*, и что эффект будет несколько больше, когда источник света находится в бесконечности подобно Солнцу, чем если это будет фонарь, находящийся непосредственно около нас.

Сравните это с пятнами света на волнующейся поверхности воды (рис. 34). Для этого следует представить себе, что ветки простираются не во всех направлениях, а лишь в одной плоскости (поверхность воды). Небольшие полосы, лежащие в этой плоскости и все же образующие части концентрических окружностей вокруг *OL*, расположены каждая под прямым углом к плоскости *OVL*, а все они вместе образуют дорожку света в этой плоскости. Это совершенно аналогично случаю с водяными волнами.

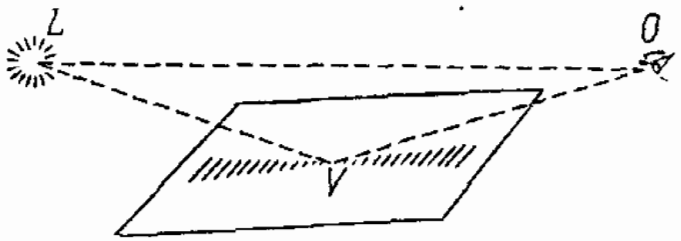



Рис. 34. Сравните световые круги в кроне дерева со световой дорожкой на волнующейся воде.

Подобные же явления можно наблюдать при заходе Солнца, освещающего поле пшеницы, или в туманную погоду, когда вы смотрите на уличный фонарь сквозь паутину, осыпанную мелкими каплями росы. Здесь сверкают главным образом маленькие черточки, перпендикулярные к плоскости падения луча; они-то и создают впечатление концентрических окружностей, располагающихся вокруг источника света.

## 27. Преломление света при переходе из воздуха в воду

Шест, которым пользуются для отталкивания лодки, как будто переломлен в том месте, где он входит в воду. Это впечатление у нас создается вследствие преломления лучей света при переходе из воздуха в воду, или, наоборот, из воды в воздух. Однако заметьте, что «сломанная» палка ни в коем случае не дает представления о том, как изогнут луч света,— луч изогнут в совершенно противоположном направлении! Это видно на рис. 35.

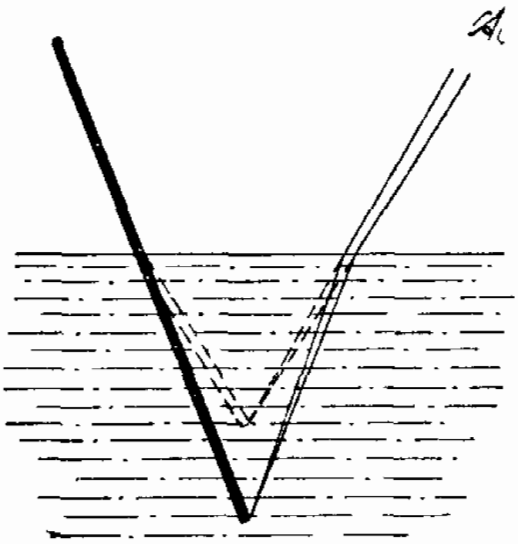


Рис. 35. В результате преломления лучей света палка кажется изогнутой.

Оцените глазом глубину какого-нибудь предмета под водой и попробуйте быстро его схватить. Как правило, это вам не удастся, потому что вследствие преломления световых лучей предмет кажется как бы приподнятым кверху (ср. рис. 35); в действительности предмет лежит глубже, чем вы предполагаете. Однако наблюдаемое явление не настолько просто, чтобы его можно было правильно описать, утверждая, что преломление света попросту заменяет предмет его изображением, располагающимся несколько выше. Когда, например, вам придется проходить или проезжать на велосипеде вдоль канавы с прозрачной водой, обратите внимание на то, что растения, находящиеся под водой, подвергаются удивительным изменениям; их смещенные изображения движутся, и чем больше вы наклоняетесь к воде, тем выше к поверхности они поднимаются (фотография V) *).

Солнце бросает яркие полосы света через прозрачную воду на дно — они хорошо видны в мелком водсеме или вблизи берегов реки. Гребни мелких волн служат линзами и собирают лучи света в фокусе в виде полос, которые медленно движутся вместе с волнами [рис. 36 **) и фотография VI]. С подобным же явлением мы встречались в

*) F. A. Forel, Le Léman, II, Lausanne, 1895, 456.
**) Le Léman, II, 454.

главе об отражении света (§ 9). Когда лучи падают наклонно, полосы света по краям окрашены; сторона, ближняя к Солнцу — голубая, сторона, отдаленная от Солнца — красноватая: голубые лучи преломляются сильнее, чем красные. Это — явление дисперсии света.

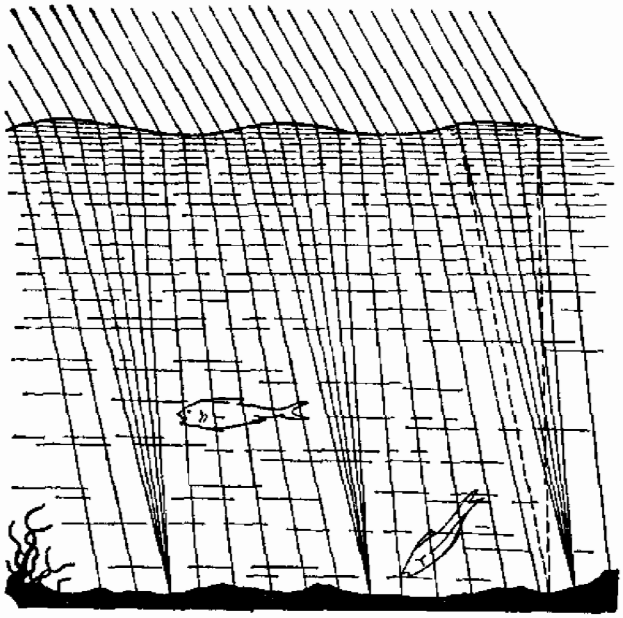


Рис. 36. Лучи Солнца проникают в воду. Проходя через волны, лучи преломляются и собираются в световые полосы. Голубые лучи (пунктир) отклоняются сильнее других.

Бросьте белый камень в глубокую прозрачную воду и посмотрите на него с некоторого расстояния; камень покажется голубым сверху и красным снизу *); это также объясняется явлением дисперсии света.

## 28. Преломление на выпуклой поверхности воды

Как только поверхность воды отклоняется от идеально ровной плоскости, это становится немедленно заметным по изменению направления преломляющихся световых лучей и неравномерной яркости на дне.

Понаблюдайте за небольшими завихрениями на каком-нибудь ручье. Каждое такое завихрение как бы немного вдавливает водяную поверхность, и сразу же на ней возникают темные пятна, проносящиеся над светлой песчаной поверхностью дна. Если внимательнее всмотреться, то можно увидеть, что каждое такое пятно окаймлено светлой полоской. Рис. 37 поясняет нам, как возникает это явление.

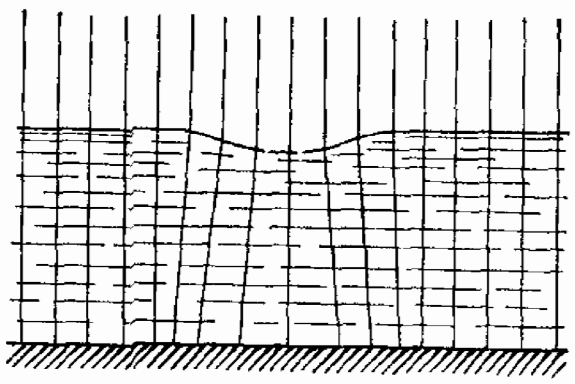


Рис. 37. Впадина на поверхности воды действует подобно рассеивающей линзе.

Нечто подобное можно заметить на тенях водомерок, известных у нас под названием «водяных клопов», которые бегают по поверхности воды как конькобежцы. Они удерживаются на поверхности силами поверхностного натяжения. Каждая лапка погружена в воду и образует крошечное углубление. Мы видим теневое изображение: шесть маленьких темных пятнышек со световым ореолом вокруг них.

*) L. Boltzmann, Populäre Schriften, 59.

Тени плавающих листьев водяной лилии на дне прозрачного пруда удивительно напоминают тень пальмового листа своими изрезанными краями. Объясняется это тем, что лист по краям слегка скручен и в этих местах вода несколько приподнимается под действием капиллярных сил. В образовавшихся маленьких «призмах» лучи света преломляются и неправильными пучками отбрасываются в направлении тени на дне *).

## 29. Преломление в неровных стеклах

Если смотреть через окна старых вагонов, можно заметить, что некоторые части стекла совершенно искажают пейзаж. Если Солнце светит через такое стекло на лист бумаги, то эти участки стекла отбрасывают на бумагу светлые и темные полосы. Отодвиньте лист бумаги подальше от стекла, и каждая полоса превратится в очень яркую и резкую линию.

По-видимому, поверхность стекла не плоская и его более тонкие и более толстые участки действуют как неправильно расположенные линзы, рассеивая или собирая лучи света и создавая фантастические полосы в фокусе (ср. § 27).

Даже очень маленькие отклонения лучей вызывают значительное изменение яркости, так что на оконном стекле полосы заметны всюду.

Качество «зеркальных» стекол бывает намного лучше. Однако, находясь в тени и на почтительном расстоянии от такого окна, можно и в этом случае видеть полосы на стекле в бо́льшем или меньшем количестве и определить их направление.

Особенно хорошо видны эти полосы, когда лучи Солнца проникают в крону дерева и образуют солнечное изображение (§ 1), которое потом падает на стекло окна. В самом деле, падающий пучок лучей направлен теперь на стекло резче и прямее, так как данный участок получает свет уже не от всего солнечного диска, а только от его маленькой части. Теперь становится видимым любое маленькое отклонение лучей.

Один читатель, страдающий близорукостью, пишет мне, что он видит отчетливо то одну, то другую звезду, стоя в нескольких метрах от оконного стекла. Вероятно, это происходит потому, что случайная выпуклость стекла исправляет недостатки его зрения.

## 30. Двойные отражения от зеркального стекла

Посмотрите на отражение отдаленного фонаря или Луны в окне. Вы увидите *два* отражения. Если вы будете двигаться, изображения будут перемещаться неодинаково по отношению друг к другу по

*) K. Mailaun, Pflanzenleben.

мере того, как отражение попадает на ту или иную часть окна *). Сравнительно недавно некий «философ» указал, что это явление необъяснимо законом причинности **). На помощь здесь приходит физика.

Мы заметим, что хорошо отполированные плитки черного стекла, украшающие некоторые магазины и учреждения, не удваивают отражений. Тогда ясно, что одно отражение получено от передней поверхности стекла, а другое — образовано лучами, которые прошли через стекло, отразились от задней поверхности и достигли нашего глаза, снова пройдя через стекло. Если стекло черное, лучи от второго отражения поглощаются.

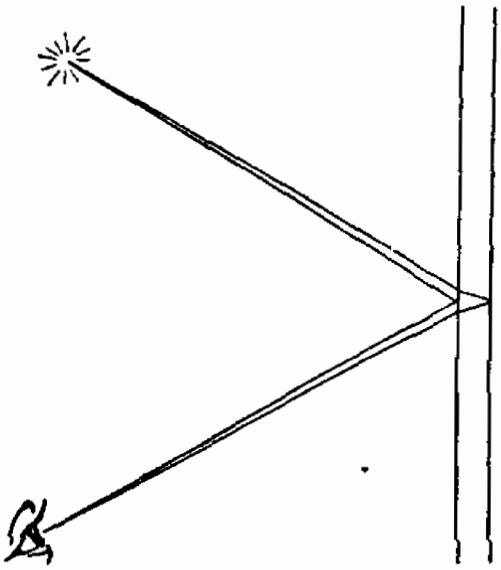


Рис. 38. Зеркальное стекло, плоскости которого в точности параллельны, дает двойные изображения, которые, однако, лежат чрезвычайно близко друг к другу.

Преломление вызывает небольшое отклонение одного из лучей (рис. 38). Может ли это быть причиной двойного изображения? Нет, поскольку в этом случае: *а*) изображения не должны были бы находиться то ближе, то дальше друг от друга в отдельных частях одного и того же стекла; *б*) они не должны были бы лежать дальше друг от друга, чем на толщину стекла, и их едва ли можно было бы различить; *в*) смещение или перемещение изображения должно было быть равно нулю для очень малых и очень больших углов падения луча (с максимумом около 50°, как легко можно подсчитать), тогда как мы наблюдаем двойные изображения и в случае нормального падения луча; *г*) для источника света в бесконечности, например, Луны, расстояние между двойными изображениями всегда было бы равно нулю.

Вывод следующий: плоскопараллельная стеклянная пластина не может дать такого двойного отражения. Если же, однако, пластина стекла клиновидна, такие отражения могут возникнуть.

Но прежде чем мы полностью удовлетворимся этим объяснением, мы должны вычислить, как велик должен быть угол между передней и задней поверхностями стекла, чтобы объяснить наблюдаемое явление. Едва ли вероятно, чтобы в хорошем оконном стекле отклонение от параллельности было велико.

Сначала предположим, что плоскости параллельны, и проследим за одним лучом после того, как он разделился. Мы увидим, что два отраженных луча по-прежнему параллельны и лишь слегка сдвинуты по отношению друг к другу.

---

*) Zs. f. d. phys. chem. Unterricht **4**, 86, 1891; **37**, 90, 1924.
**) E. Barthel, Arch. for. System. Philos. **19**, 355, 1913.

Пусть теперь передняя плоскость $AB$ будет наклонена под небольшим углом $\gamma$ к задней плоскости $CD$ (рис. 39). Луч $I$ должен повернуться на угол $2\gamma$. Чтобы проследить путь луча $II$, примем $CD$ за зеркало, отражающее $AB$ в виде $A'B'$, а луч $II'$ — как отражение луча $II$. Теперь мы видим, что луч $LII'$ прошел через призму $ABB'A'$ с малым углом преломления $2\gamma$; геометрическая оптика учит, что такая призма вызывает угловое отклонение пути луча $2\gamma(n-1)$, в случае, если угол падения не слишком велик ($n$ — показатель преломления). Таким образом, угол между $I$ и $II$ будет:

$$2\gamma + 2\gamma\,(n-1) = 2n\gamma.$$

Для стекла $n = 1{,}52$ и искомый угол равен приблизительно $3\gamma$.

Из рис. 40 ясно, что случится, когда наблюдатель из точки $O$ посмотрит на источник света, находящийся очень далеко от него; два луча $I$ и $II$, исходящие от этого отдаленного источника и идущие практически параллельно, приходят к глазу наблюдателя под углом $3\gamma$ *).

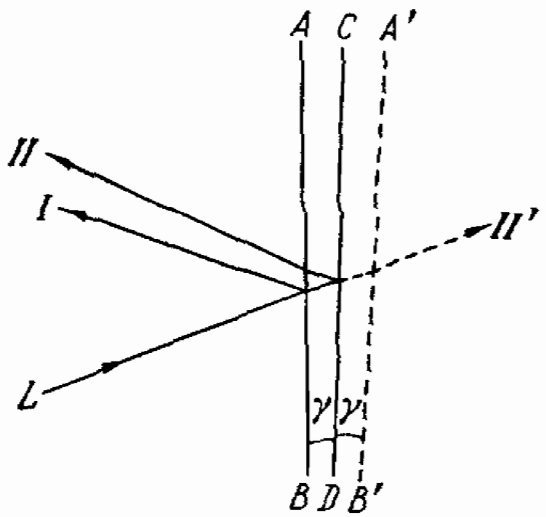



Рис. 39. Возникновение двойных изображений при отражении от стекла, толщина которого в различных местах неодинакова.

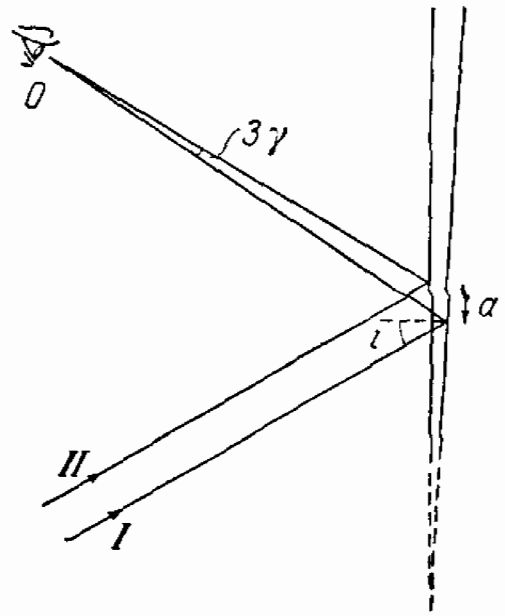



Рис. 40. Как определить по угловому расстоянию $3\gamma$ между двумя отражениями степень сближения передней и задней поверхностей оконного стекла.

Итак, угол между двумя поверхностями стекла равен одной трети углового расстояния между двумя отражениями.

Угловое расстояние можно измерить, например, путем определения линейного расстояния $a$ между отражениями на стекле; затем эту величину делят на расстояние $R$ между глазом и стеклом и умножают на $\cos i$.

Полученные таким образом углы для обычного оконного стекла оказываются равными нескольким тысячным радиана **), или нескольким минутам дуги. Таким образом, толщина оконного стекла на длине в 5 *см* изменяется лишь на 0,1 *мм*. Эта разница настолько

*) Доказательство см. § 31.

**) О радиане см. § 1.

мала, что непосредственно без очень точных измерений толщины заметить ее невозможно. Такие измерения были специально проделаны, и они подтвердили приведенную выше оценку. Разве это не чудесно, что мы в состоянии узнать о таких малых пороках стекла, не затрачивая особых усилий, просто прогуливаясь по улице! И более того, нам теперь удалось доказать правильность наших объяснений двойных отражений. Если мы не можем найти объяснения какому-нибудь явлению природы, в этом следует винить лишь несовершенство наших знаний!

Более общая и более точная формула: угловое расстояние между двумя отражениями равно $2m\gamma \frac{R'}{R+R'}$, где $R'$ — расстояние от источника света до стекла, $R$ — расстояние от глаза до стекла; $2m$ имеет следующие значения:

| угол падения | $i=0°$ | 20° | 40° | 60° | 80° | 90° |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $2m=3{,}0$ | 3,1 | 3,6 | 5,0 | 13,3 | $\infty$. |

Обычные оконные стекла не могут быть использованы для исследований множественных отражений, так как они своими неровными поверхностями искажают эти отражения. Наш метод слишком чувствителен к подобным порокам!

## 31. Множественные изображения в зеркальном стекле в проходящем свете *)

Как-нибудь вечером посмотрите сбоку сквозь *хорошее* оконное стекло трамвая, автобуса или поезда на отдаленный фонарь или на Луну. Вы увидите несколько изображений на почти равных расстояниях друг от друга; первое изображение будет ярким, а последующие — все более и более слабыми. Чем более наклонно падает ваш взгляд на стекло, тем больше становится расстояние между изображениями и тем меньше они отличаются по яркости друг от друга.

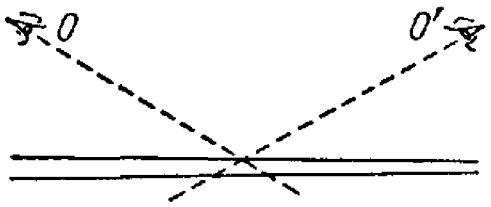



Рис. 41. Самое яркое из нескольких изображений всегда располагается со стороны наблюдателя.

Совершенно ясно, что такое явление возникает как вторичное отражение от передней и задней поверхностей стекла. Оно очень напоминает явление двойных отражений, и у нас есть все основания полагать, что передняя и задняя поверхности не параллельны. Однако здесь есть и дополнительное доказательство. При параллельных поверхностях самое яркое отражение будет непременно лежать со стороны, ближайшей к наблюдателю, причем безразлично, смотрим ли мы через стекло из точки $O$ или $O'$ (рис. 41). Опыт, однако, говорит нам, что наиболее яркое отражение всегда находится по одну и ту же сторону (всегда либо направо, либо налево), до тех

*) H. M. Reese, J. Optic. Soc. Amer. **21**, 282, 1931

пор, пока наблюдатель смотрит через определенную точку стекла. Но в одном и том же стекле можно найти и места, где наиболее яркие изображения будут помещаться справа, и места, где такие изображения будут лежать слева. В первом случае мы имеем дело с клиновидной областью стекла, утолщение которой обращено к нашему глазу; во втором случае область наибольшей толщины обращена в сторону, противоположную глазу.

Вычислим угловое расстояние между изображениями несколько иным, чем в § 30, путем. Из рис. 42 мы видим, что углы, под которыми лучи $L_1$, $L_2$, $L_3$...падают на заднюю поверхность стекла, равны $r+\gamma$, $r+3\gamma$, $r+5\gamma$.... Таким образом, если углы выхода этих лучей равны $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$,..., то

$$\sin\alpha = n\sin(r+\gamma)$$

или, поскольку $\gamma$ — малый угол,

$$\sin\alpha_1 = n\sin r + \gamma n\cos r;$$

точно так же

$$\sin\alpha_2 = n\sin r + 3\gamma n\cos r.$$

Вычитая из второй формулы первую, мы получим

$$\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1 = 2\gamma n\cos r.$$

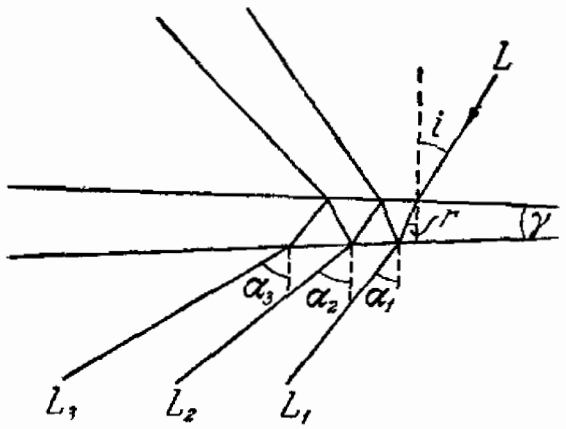



Рис. 42. Множественные изображения в проходящем свете.

Угол $\alpha$ увеличивается на небольшую величину, поэтому мы можем принять разность $(\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1)$ равной дифференциалу $\sin\alpha$, т. е.

$$\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1 = d(\sin\alpha) = \cos\alpha\cdot d\alpha = \cos\alpha\cdot(\alpha_2-\alpha_1).$$

Отсюда

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{2n\cos r}{\cos\alpha}\cdot\gamma.$$

Используя рис. 42, подобное же доказательство можно провести и для множественных отражений. Расстояния между последовательными изображениями одинаковы, независимо от того, рассматривает ли их наблюдатель в отраженном или проходящем свете. Коэффициент, на который умножают $\gamma$, фактически тот же, который в § 30 обозначен как $2m$; там же приведены его значения.

## 32. Отражение кроны дерева в стекле окна

Листва дерева, отраженная в стекле, толщина которого непостоянна, показывает своеобразную «штриховатость». Поскольку нам известно, как всякая светлая точка дает двойное отражение в зеркале, нам становится сразу же понятным, почему листья стали двойными и почему все эти сдвоенные изображения смещены в одном и том же направлении, хотя бы даже внутри определенной одной части стекла. Направление «штриховатости» определяется углом между передней и задней плоскостями стекла.

Сравните это наблюдение со следующим опытом, который можно провести при помощи любого толстого зеркала Обрызгайте его водой, и вы получите картину «штриховатости», но на этот раз все полосы будут брать свое начало в одной и той же точке—это будет отражение вашего глаза. Причина смещения теперь — толщина стекла.

## 33. Следы стеклоочистителя

Часто можно наблюдать, как стеклоочиститель автомобиля или трамвая оставляет за собой концентрические круги, в которых утром преломляются лучи Солнца, находящегося низко над горизонтом, а вечером — свет уличных фонарей.

Это — не что иное, как световая дорожка, берущая начало от оси вращения Она всегда бывает направлена в сторону Солнца. Эта прямая световая дорожка является, собственно говоря, дугой гиперболы, но мы наблюдаем ее на маленьком участке.

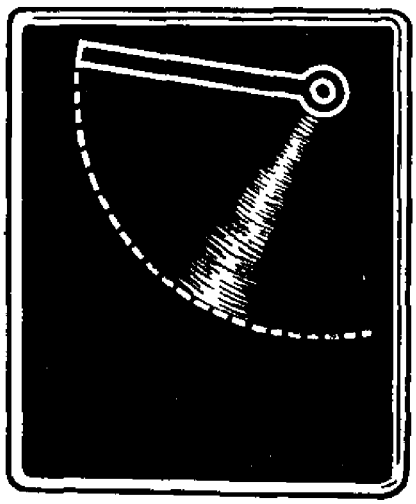


Рис 43 Отражение от полосы, оставленной стеклоочистителем на ветровом стекле автомобиля

Теория этого явления та же, что и при объяснении отражения света в кругах от дождевых капель (§ 25). При этом не имеет существенного значения, каким путем происходит отклонение световых лучей, преломляются они или отражаются; главное, что в обоих случаях лучи остаются в плоскости падения.

Но, кроме того, здесь можно наблюдать еще нечто своеобразное.

Если закрывать попеременно то левый то правый глаз, то можно видеть, что световая дорожка будет менять направление. И это неудивительно, поскольку наш правый глаз видит Солнце через иную точку стекла, чем левый, а световая дорожка, как нам известно, берет свое начало всегда от оси вращения «дворника». Взглянем теперь обоими глазами одновременно и увидим, как «сольются» эти различные изображения в одну дорожку.

Это — пример того, что мы называем *стереоскопией.*

## 34. Капли воды как линзы

Капли дождя на окнах вагона создают крошечные изображения подобно сильным линзам. Эти изображения, конечно, искажены, поскольку капля по форме далека от совершенной линзы.

Очень интересно, что изображения перевернуты вверх ногами, и, в то время, как нам кажется, что пейзаж движется в направлении, п р о т и в о п о л о ж н о м движению поезда, мы видим его изображение движущимся в т о м ж е н а п р а в л е н и и, что и поезд.

Изображение столба в верхней части кажется толще, чем внизу, так как изображение, создаваемое линзой, тем меньше, чем меньше ее фокусное расстояние, т. е. чем больше ее кривизна, верхняя часть дождевой капли более плоская, чем нижняя, и поэтому дает большее изображение.

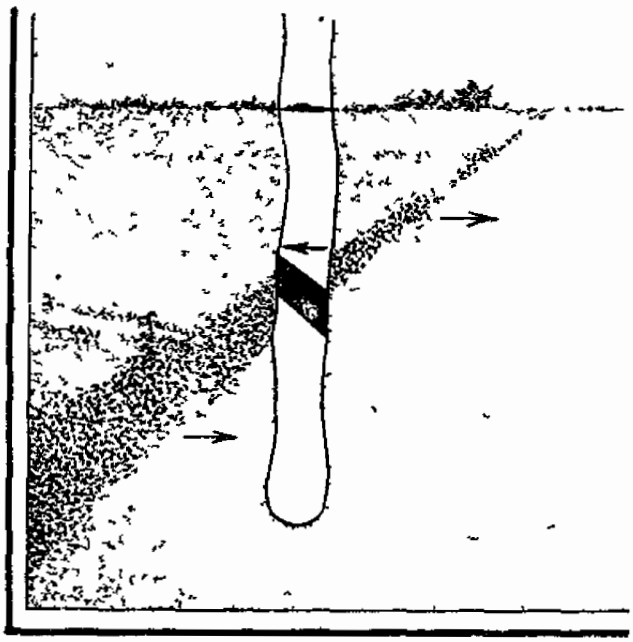


Рис. 44. Водяные капли на окне движущегося поезда преломляют свет как цилиндрические линзы.

## 35. Радужные цвета в каплях росы и кристаллах инея

Кто не видал, как переливается драгоценными камнями утренняя роса? Взгляните, как ослепительно сверкают капли росы на коротко подстриженной траве газона и как они мерцают подобно звездам на длинных раскачивающихся травинках.

Рассмотрим вблизи росинку на стебельке травы. Не рвите его! Не дотрагивайтесь! Крошечные шарообразные капли не смачивают листок; они примыкают к листку, но почти повсюду между каплей и листом — прослойка воздуха. Лист, покрытый росой, кажется серым из-за того, что лучи света отражаются в крошечных каплях и снаружи, и изнутри, большое число лучей даже не достигает самой травинки (ср. § 185). Большие плоские капли кажутся серебряными, если на них смотреть под сравнительно большим углом — в этом случае лучи полностью отражаются задней поверхностью капли.

Выберем большую каплю и посмотрим на нее одним глазом, мы увидим, как появятся цвета сразу же, как только угол с направлением падения луча станет достаточно большим. Сначала мы увидим голубой цвет, затем — зеленый, а затем совершенно отчетливо — желтый, оранжевый и красный цвета. Это и есть то явление, которое мы часто наблюдаем в больших масштабах в любой радуге (§ 135).

Подобные же искрящиеся цвета можно видеть в кристаллах инея и в свежевыпавшем снеге.

Сравните § 156 и 171.

«Вы должны попросить профессора Клифтона объяснить вам, почему капля воды стирает краску с зеленого листа или с голубого цветка и окрашивает их в мягкий серый цвет, и сама при этом выглядит на траве или на листке щавеля как светящаяся туманность, и в то же время она способна подчеркнуть все теплые цвета, так что вам никогда без капельки росы, упавшей на цветок, не удастся увидеть настоящего цвета гвоздики или розы»

(Ruskin, The Art and Pleasures of England.)

# ИСКРИВЛЕНИЕ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ В АТМОСФЕРЕ

## 36. Земное искривление лучей

Небесные тела кажутся нам несколько выше над горизонтом, чем в действительности; чем ближе они к горизонту, тем больше это смещение. Этим объясняется сплюснутость Солнца и Луны около горизонта. При заходе Солнца нижний край солнечного диска кажется в среднем на 35′ выше, чем в действительности, а верхний край,

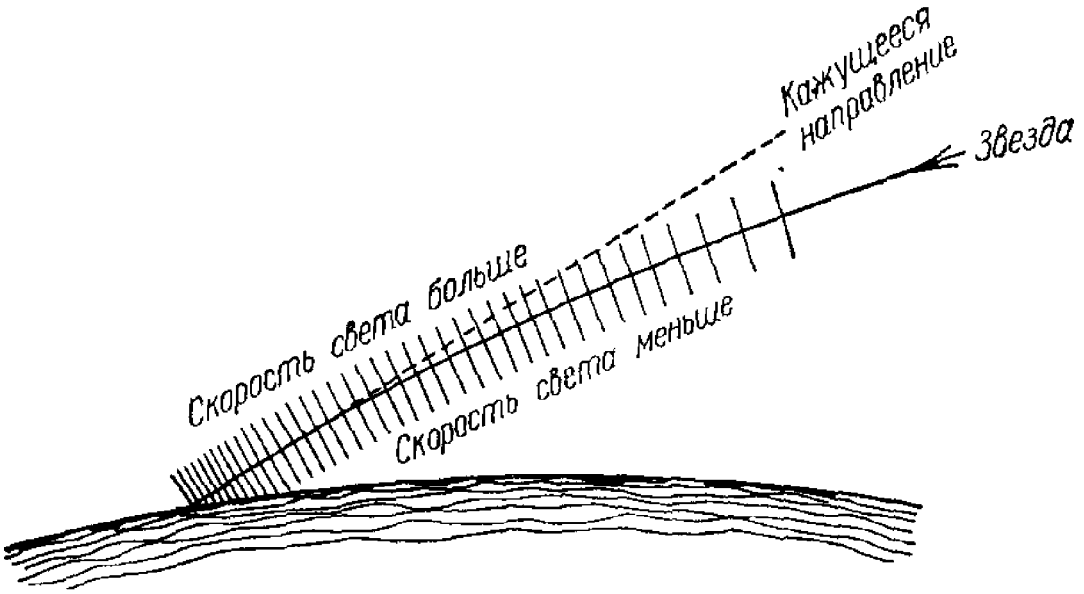



Рис. 45. В результате земного искривления лучей небесные тела кажутся выше, чем в действительности.

находящийся дальше от горизонта, смещается только на 29′. Таким образом, сплюснутость Солнца достигает 6′ или $^1/_5$ солнечного диаметра.

Это явление, которое наглядно показывает, как увеличивается смещение световых лучей у горизонта, вызывается увеличением плотности атмосферы в ее нижних слоях. Соответственно с увеличением плотности атмосферы повышается показатель преломления воздуха и уменьшается скорость света; поэтому, когда световые волны, излучаемые какой-либо звездой, проникают в нашу атмосферу, они движутся несколько медленнее со стороны, ближайшей к Земле, и их фронт постепенно поворачивается. Световые лучи, указыва-

ющие, как распространяется фронт волны, также изгибаются, и удаленные объекты кажутся поэтому приподнятыми (рис. 45).

Чем наклоннее лучи, тем длиннее их путь в атмосфере и тем сильнее их искривление.

Земное искривление лучей (в астрономии это явление называют *рефракцией*) постоянно меняется из-за того, что все время меняется распределение температуры в атмосфере. Интересно отмечать в течение нескольких дней моменты восхода и захода Солнца и затем сравнить результаты со временем, вычисленным по таблицам и ежегодникам. Предварительно часы следует выверить с точностью до одной секунды, что нетрудно сделать с помощью сигналов, передаваемых по радио. Оказывается, мы можем ожидать разницу во времени восхода или захода, равную одной или двум минутам. Этот эксперимент легко провести жителям приморья, поскольку здесь заход Солнца можно наблюдать на чистом и открытом горизонте. Такой опыт можно сочетать с наблюдениями за высотой горизонта, очертаниями солнечного диска и с наблюдением зеленого луча.

## 37. Аномальное искривление лучей без отражения

Стоя на берегу моря, обратите внимание на то, как часто над горизонтом поднимаются далеко отстоящие от нас волны, в то время как такие же волны вблизи берега не достигают линии горизонта, хотя на плоской Земле линия, соединяющая гребни волн одинаковой высоты, должна проходить на одном уровне и потому также должна пересечь горизонт. Это явление можно наблюдать также и в открытом море. В штормовую погоду встаньте на одной из нижних палуб; вы увидите, что волны неподалеку от вас не достигают линии горизонта; сравните их с волнами, находящимися вдалеке. Наши наблюдения можно объяснить только кривизной поверхности Земли, которая становится для нас очевидным фактом (рис. 46).

Однако описанное явление меняется в зависимости от земного искривления лучей. Иногда это особенно хорошо заметно; тогда горизонт кажется совсем близким, суда кажутся большими и расположенными от берега дальше, чем обычно. Создается впечатление, будто кривизна поверхности Земли увеличилась. Иногда, наоборот, спокойное море напоминает огромную вогнутую чашу. Те предметы, которые при обычных условиях находятся вне пределов нашего зрения, становятся видимыми, приближаются к нам и кажутся меньше. Далекие суда, которые в нормальных условиях должны были бы находиться на горизонте или за горизонтом, кажутся нам плавающими в этой огромной водяной долине. Каждое судно как бы сжато по вертикали, линия горизонта проходит над его корпусом, а глаз наш, как правило, находится ниже корпуса судна. Горизонт представляется необычайно далеким.

Эти два характерных состояния мы назовем *выпуклой* и *вогнутой* поверхностью воды *) (рис. 47). В первом случае плотность атмосферы с высотой уменьшается слишком медленно, или даже увеличивается в нижних слоях. Второй случай возникает при слишком быстром уменьшении плотности снизу вверх. Подобного рода аномалии

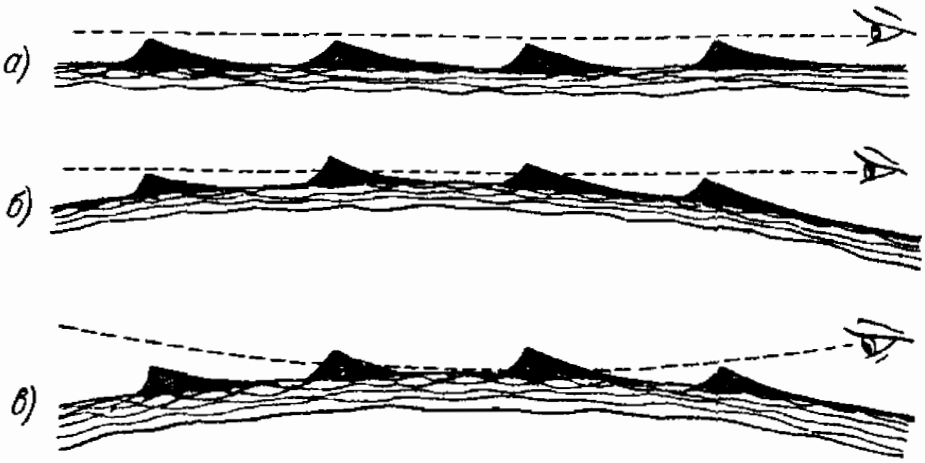



Рис. 46. Волны, видимые на линии горизонта: *а*) поверхность Земли плоская, искривления лучей нет; *б*) поверхность Земли выпуклая, искривления лучей нет; *в*) то же, но лучи света искривлены.

плотности атмосферы являются следствием необычного распределения температуры. Если море теплее воздуха, то самые нижние слои воздуха нагреваются больше, чем верхние. Поэтому нижние слои

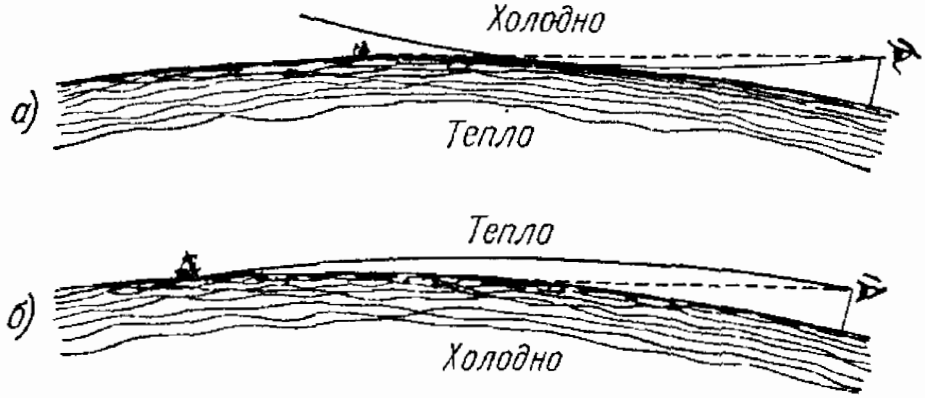



Рис. 47. *а*) Исчезновение отдаленных объектов; поверхность воды кажется выпуклой. *б*) Отдаленные объекты, обычно невидимые, становятся видимыми; поверхность воды кажется вогнутой. (На первом и втором рисунках искривление светового луча преувеличено.)

становятся оптически более разреженными и менее преломляющими; лучи света изгибаются в направлении от Земли. Если море холоднее воздуха, лучи изгибаются в противоположном направлении. По-

*) Proc. Roy. Soc. Edinb. **32**, 175, 1912; F o r e l, C. R. **153**, 191.

пробуйте в такие дни измерить температуру на различной высоте, чтобы убедиться в правильности нашего объяснения.

Еще более характерно для этих двух оптических состояний изменение видимой высоты горизонта. Чтобы измерить видимую высоту горизонта без помощи специальных приборов (рис. 48), мы должны выбрать определенную фиксированную точку $A$ на берегу и переменную точку $B$ на шесте или стволе дерева, расположенном на расстоянии нескольких сот метров от берега. Мы становимся около $B$ и отмечаем высоту, на которой находится наш глаз, когда

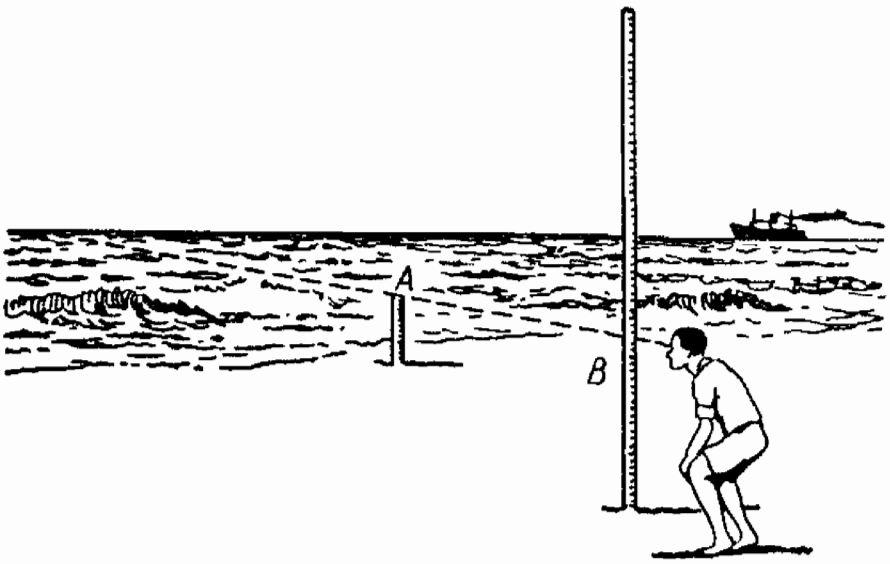



Рис. 48. Как измерять изменения земного искривления лучей.

линия горизонта проходит точно через точку $A$. Если вода холоднее воздуха, то горизонт кажется выше, и точка $B$ опускается. Если вода теплее воздуха, горизонт опускается, точка $B$ поднимается. Здесь могут быть изменения порядка 6′ или даже 9′ в ту или иную сторону. Чаще всего эти изменения случаются в безветренную погоду; если $AB$ равняется 100 метрам, то эти изменения соответствуют 20 или 30 *см*. Подобные измерения были удачно проведены в Зандфоорте при помощи каменного столба, расположенного на одной из улиц, ведущих к морю. Расстояние $AB$ равнялось 90 *м*, разница высот достигала 5 *см* (с точностью до $\pm 0{,}5$ *см*). Еще лучше такие наблюдения вести с помощью бинокля.

В исключительно редких случаях искривление лучей бывает чрезвычайно сильным и вызывает одно из самых замечательных оптических явлений. Бывают дни с настолько хорошей видимостью, что расположенный очень далеко город или маяк внезапно становится видимым, в то время как в обычных условиях он остается за горизонтом. Часто в таких случаях мы бываем обмануты, думая, что эти объекты располагаются совсем недалеко от нас. Однажды удалось наблюдать два таких совершенно удивительных явления в районе Ла-Манша. Невооруженным глазом можно было рассмотреть все

французское побережье против Гастингса, в то время как в обычных условиях эту часть побережья нельзя увидеть даже в лучший полевой бинокль. В другой раз из Рамсгейта был виден весь Дуврский замок, появившийся из-за холма, который обычно скрывает бо́льшую его часть.

Иногда, наоборот, отдаленные объекты, обычно поднимающиеся над горизонтом, уходят за горизонт («погружаются»), а горизонт кажется очень близким. В такие дни удаленные предметы — лодка, прибитый волнами ящик, сами волны — представляются непомерно большими. Наблюдения над явлениями подобного рода следует всегда вести в сочетании с измерениями температуры поверхности моря и температуры воздуха.

## 38. Мираж в миниатюре (фотография VII)

Мираж в пустыне, известный всем по книгам, легко можно увидеть в миниатюре. Найдем длинную, ровную стену или каменный парапет не менее 8 *м* длиной, который был бы обращен к югу и освещен Солнцем. Затем, приблизив лицо к стене, посмотрим вдоль нее. В это время кто-нибудь, постаравшись отойти как можно дальше от вас, постепенно подносит какой-нибудь блестящий предмет все ближе и ближе к стене. Таким предметом может послужить обычный ключ, сверкающий на Солнце. Как только ключ оказывается на расстоянии нескольких сантиметров от стены, его вид вдруг удивительно искажается, и изображение, отраженное от поверхности стены, начинает как бы приближаться к ключу. Часто отражается и вся рука, держащая ключ. Если вам такой опыт удастся, то вы сможете легко наблюдать это явление и с любым другим отдаленным предметом, глядя вдоль самой поверхности стены. Подобное отражение можно получить и при более короткой стене, если поместить глаз совсем близко к ней; для этого необходимо, чтобы наблюдатель мог встать у конца стены.

Если очень длинная стена сильно накалена, появляется иногда и второе отражение, и оно будет не перевернутым по отношению к предмету, а прямым *). Это происходит согласно общему закону, который утверждает, что последовательные изображения в мираже должны попеременно быть прямыми и перевернутыми (фотография VII).

Отражения возникают вследствие того, что воздух около нагретой стены теплее и поэтому более разрежен, так что его показатель преломления уменьшается. Это заставляет лучи света изгибаться до тех пор, пока они не становятся параллельными поверхности, а затем они отклоняются от нее (рис. 49).

---

*) W. H i l l e r, Phys. Zs. **14**, 718, 1913; **15**, 303, 1914.

Это явление иногда называется «полным отражением», однако этот термин неправилен, ибо переход между различными слоями всюду постепенен; с другой стороны, всегда следует иметь в виду, что искривление луча происходит в самой непосредственной близости к нагретому объекту. Возможно, что вдоль стены располагается

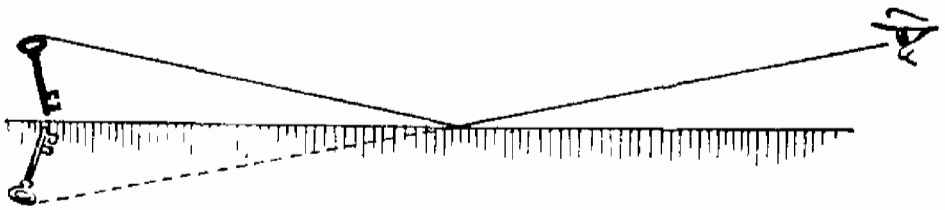


Рис. 49. Мираж на освещенной Солнцем стене (для наглядности расстояния по вертикали сильно преувеличены).

слой воздуха толщиной всего в несколько сантиметров с температурой, приблизительно равной температуре стены. Вне этого слоя температура воздуха падает сначала быстро, а затем медленнее.

Было бы интересно измерить температуру стены и близлежащих слоев воздуха и с помощью таких измерений количественно объяснить наблюдаемое искривление лучей.

Прежде подобные миражи в миниатюре иногда замечали вдоль горячих труб пароходов *). Луна, Юпитер, восходящее Солнце отражались от трубы как от серебряного зеркала, однако, с мачтой корабля такого явления не наблюдалось. Вероятно, у современных пароходов трубы недостаточно накаляются, чтобы мог возникнуть мираж.

Если смотреть вдоль крыши автомобиля, который долго стоял на Солнце, то изображения далеких объектов заметно искажаются; правда, для этого нужно смотреть очень близко вдоль нагретой поверхности крыши.

Даже когда вы смотрите вдоль небольшой доски не длиннее 50 *см*, лежащей на Солнце, вы часто можете увидеть удаленные предметы как бы «удлиненными» и «притягивающимися» к этой доске.

## 39. Большие миражи над горячими поверхностями («нижние миражи») (фотография VIII) **)

Для образования миража необходимы: 1) плоская поверхность, 2) большое пространство для наблюдения, 3) сильное нагревание поверхности Земли. Такая равнинная страна, как Голландия,

*) B a l l, Phil. Mag. **35**, 404, 1868.

**) Литература по этому вопросу довольно обширна. Например, P e r t n e r - E x n e r, цит. соч.; B i o t, Mém. de la classe des sc. math. et phys. de l'Institut de France, 246, 1809; Trans. Edinb. Soc. **30**, 551, 1883; Fr. N ö l k e, Phys. Zs. **18**, 134, 1917; A. W e g e n e r, Ann. d. Phys. **57**, 203, 1918; R. M e y e r, Meteor. Zs. **52**, 405, 1935; W. E. S c h i e l e, Veröff. Geophys. Inst., Leipzig **7**, 101, 1935 (с многочисленными ссылками).

отвечает двум первым требованиям и потому здесь часто можно наблюдать большие миражи: нередко в воздухе появляются такие же великолепные отражения, как и в раскаленных песках Сахары. Иногда их можно увидеть только сильно пригнувшись к земле. Миражи становятся во много раз яснее и появляются удивительно часто, если пользоваться при этом полевым или театральным биноклем.

Мы опишем три случая, наиболее благоприятных для наблюдения этих явлений.

Прежде всего, вы увидите мираж в солнечный день над асфальтовыми дорогами. Термометр показывает, что на высоте 1 *см* над поверхностью дороги температура воздуха по сравнению с температурой асфальта падает на 20—30°. Выше падение температуры равно нескольким градусам на 1 *см* *). Мои наблюдения подтверждают, что миражи даже лучше видны над современными прямыми бетонными дорогами. Эти дороги не поглощают солнечные лучи в такой степени, как асфальтовые, но обратная отдача тепла в них также меньше. В солнечную погоду нам кажется, что такая дорога покрыта лужами воды, которые становятся больше и чище по мере того, как вы все больше наклоняетесь к дороге. В лужах отражаются далекие предметы, яркие и красочные. То, что мы принимаем за воду, есть не что иное, как чистое небо, отраженное дорогой в некотором отдалении от нас.

Замечательно, что отражение не изменяется даже при самом сильном движении транспорта в то время как вихри от колес мчат по дороге мелкие обрывки бумаги, листья деревьев и пыль. Определите точно, под каким углом вы видите мираж, и высчитайте, чему равна температура воздуха, соприкасающегося с Землей (формула дана на стр. 68).

Далее мираж — обычное явление на широких лугах в равнинных районах. В какой-то степени мираж является характерной чертой такого ландшафта, по крайней мере весной и летом в ясную, не слишком ветреную погоду. По всему горизонту появляется белая полоса, над которой как бы плавают в воздухе, ни на что не опираясь, башни и верхушки деревьев. Наклонившись, вы увидите, что и ближе к вам ландшафт искажен: появляются какие-то большие блестящие лужи воды, отражающие дома на фоне чистого неба. Лучше всего можно разглядеть мираж, смотря в направлении Солнца.

Иногда около полудня искривление лучей бывает так велико, что кажется, будто повсюду вокруг вас лужи, даже если вы стоите прямо, не наклоняясь; в это время, если вы на мгновение наклони-

---

*) H. Futi, Geophys. Mag. **4** 387, 1931; L. A. Ramdas and S. L. Malurkar, Nature **129**, 6, 1932; Schiele, цит. соч., стр. 144.

тесь или подниметесь на несколько метров, вас поразит, как эти лужи то разливаются шире, то как бы съеживаются. Обратите внимание, как искажаются изображения, удлиняясь в вертикальном направлении, если только ваш глаз даже чуть выше самого благоприятного положения. Если глаз наблюдателя расположен очень низко, то основания отдаленных предметов не видны — предметы как бы висят в пространстве. Если смотреть в направлении, противоположном Солнцу, то лужи кажутся менее яркими и поэтому менее заметными, однако искажение находящихся вдали предметов и их отражения в этом случае выступают еще яснее.

Интересно измерить температуру нижних слоев воздуха на высоте, скажем, 100, 50, 25, 10 и 0 *см* от поверхности.

Утром, если светит Солнце, самая высокая температура непременно окажется возле самой поверхности Земли; если разница в температуре слоя воздуха между 100 и 0 *см* достигнет 3°, отражение будет небольшим или его совсем не окажется. Если разница достигнет 5°, отражение будет умеренным, при разнице в 8° явление будет хорошо заметным.

Самая большая разница в температуре отмечается весной в яркие солнечные дни после прохладных ночей.

Буш, первым проведший серьезные наблюдения над явлением большого миража (1779 г.), наблюдал около Бремена очень четкий мираж отдаленного города, плававший над широкими лугами.

Самый красивый мираж можно видеть на морском берегу, покрытом плотным и гладким песком, в теплую и безветренную погоду *). Если лечь на Землю, приблизив глаза к поверхности песка, то ясного отражения мы не увидим. Если немного приподнять голову, нам покажется, будто внезапно нас окружило озеро, на поверхности которого отражаются предметы от 10 до 20 *см* высотой, отдаленные от нас на 30—35 *м*.

Заметим какой-нибудь четкий, яркий предмет $H$ и будем смотреть из определенной точки $O$, которая находится на такой же высоте от Земли, как и предмет $H$ (рис. 50). Этим предметом может быть, например, сучок или палка. Теперь определим, как идет луч света, из-за которого мы видим отраженное изображение. На определенном расстоянии от наблюдателя в точке $C$ помощник наблюдателя держит вертикально небольшую линейку $M$, вдоль которой он двигает планку до тех пор, пока она не совместится: а) в точке $B$ с самим изображением, б) в точке $C$ — с вершиной самого объекта. Примем непреломленный луч света $HO$ от $H$ к нашему глазу за прямую; тогда мы можем определить последовательно высоту каждой точки пре-

*) L. G. Vedy, Meteor. Mag. **63**, 249, 1928. Исключительно красивы миражи, которые можно наблюдать над восьмикилометровой полосой песка вдоль голландских островов в Северном море.

ломленного луча света $HAO$ и таким образом точку за точкой — путь самого луча. Оказывается, что вблизи от поверхности песка луч подвергается внезапному отклонению. Если это так, мы можем ожидать, что отношение $\frac{h}{AO}=\frac{h'}{BO}$ постоянно и равно углу между по-

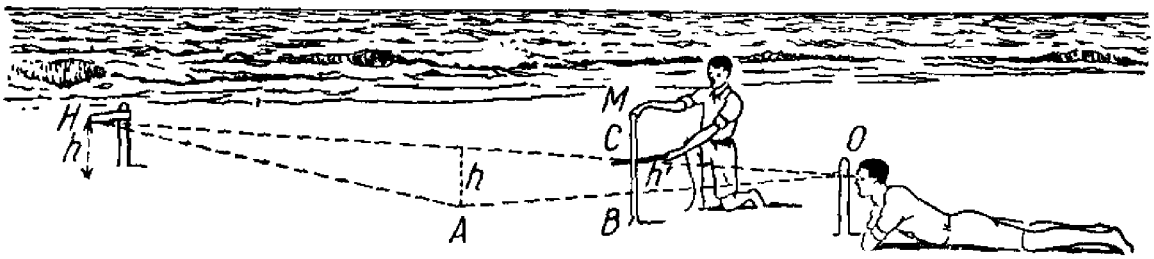



Рис. 50. Определение пути лучей, образующих мираж. Все размеры по горизонтали даны в очень малом масштабе.

верхностью песка и лучом, проходящим более длинный путь. Это предположение оказывается верным; величина угла не превышает 0,01 радиана $\approx 0°,5$.

По этому углу и известному показателю преломления воздуха для разных температур можно вычислить разницу в температуре воздуха непосредственно около Земли и на высоте глаза по формуле:

$$\Delta t_{ц}=\frac{273}{29\cdot 10^{-5}}\cdot\frac{1}{2}\left(\frac{h}{AO}\right)^{2}.$$

На практике эта разница оказывается заключенной между 5 и 35°Ц.

В предыдущем случае происхождение миража объясняется очень просто. Как только я направляю взгляд на точку, располагающуюся на поверхности Земли за определенной границей, луч зрения пронзает нагретые слои воздуха под углом, который оказывается достаточным, чтобы луч сразу же подвергся отклонению. Эффект получается такой же, как если бы в этой точке на поверхности Земли помещалось зеркало.

Таким образом, отдаленные предметы как бы делятся на две части: верхнюю и нижнюю; верхняя часть видна непосредственно, а основание дает еще и перевернутое зеркальное отражение (рис. 51, *а*).

Кривизна поверхности Земли и обычное искривление лучей оказывают большое влияние на отдаленные миражи. Из-за кривизны поверхности Земли основание отдаленных предметов остается невидимым ниже определенной «линии исчезновения». Между этой «линией исчезновения» и расположенной несколько выше «предельной» линией находится та часть предмета, которая видна отраженной, причем это отражение обычно сжато в вертикальном направлении. Наконец, выше предельной линии мы видим те предметы, которые не испытывают отражения (рис. 51, *б*).

Разумеется, распределение температуры воздуха характеризуется не только быстрым повышением температуры у поверхности Земли, но и другими, более сложными особенностями, причем каждая из них вызывает определенные оптические последствия. По

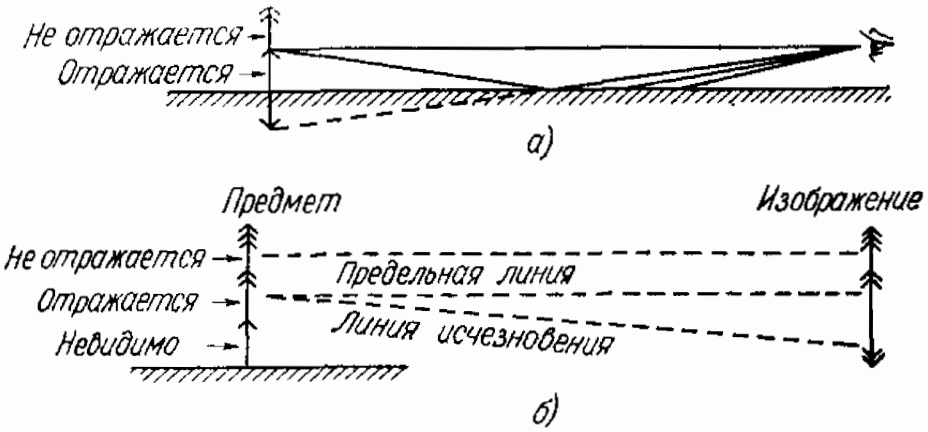



Рис. 51. Мираж дает отражение лишь части объекта: *а*) на малом расстоянии; *б*) на большом расстоянии.

очень четкому миражу над морским побережьем с помощью экспериментальных исследований, описанных выше, можно рассчитать положение линии исчезновения и предельной линии, и таким образом высчитать температуру воздуха в разных слоях. С этими результатами можно сравнить прямые измерения температуры. Однако берег часто бывает недостаточно ровным, что чрезвычайно затрудняет подобные исследования.

С борта парохода наблюдаются миражи в море (рис. 52). Объяснение им можно найти в приведенных выше рассуждениях. Если

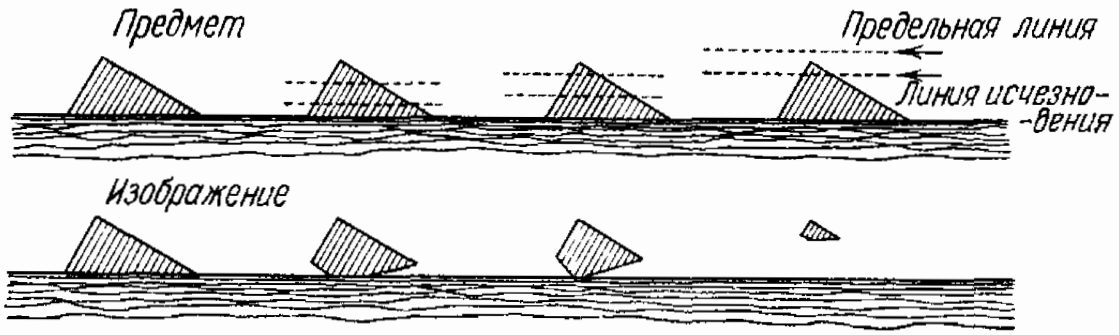



Рис. 52. Как изменяется вид острова из расположенных на различных расстояниях точек, в которых наблюдается мираж.

явление миража не слишком ярко выражено, как это бывает довольно часто, отражение (перевернутое) делается настолько сплющенным, что становится похожим на узкую горизонтальную линию, которая сливается с основанием самого предмета. Единственно, что поражает наблюдателя,— это яркая светлая полоска отраженного неба, причем тот факт, что она сжата, остается незамеченным. Находящиеся вдалеке предметы как бы плавают на некотором расстоянии над горизонтом. Такое оптическое явление, которое представляет собой не

что иное, как слабый мираж, можно увидеть на море ежедневно, особенно если пользоваться полевым биноклем. Если разные части острова находятся на неравном от нас расстоянии, более далекие части попадают между предельной линией и линией исчезновения в своей более высокой части, и в результате мы видим то, что изображено на рис. 53.

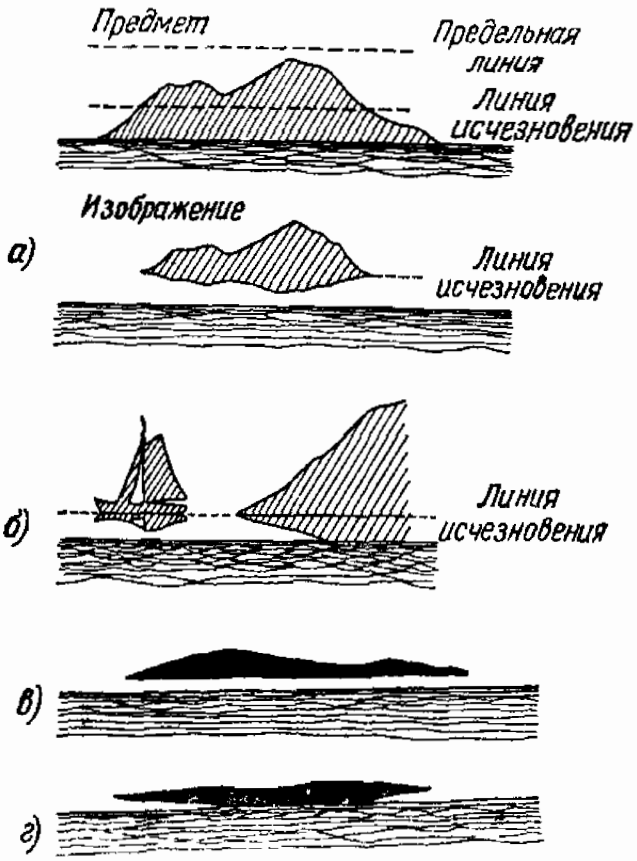



Рис. 53. Наблюдение миража во время морской поездки.

Измеряя высоту линии исчезновения над видимым горизонтом, можно легко выразить в числах «интенсивность» миража. Это можно проделать, пользуясь одним из методов, описанных в Приложении (§ 265). Полученные углы окажутся равными нескольким минутам дуги — много меньше, чем при миражах на суше *).

Существует явление, которое можно иногда принять за мираж. Это — образование слоя из мельчайших капелек воды — брызг пены прибоя. Капли эти плавают в воздухе над морем и покрывают нижние части отдаленных предметов легким слоем туманной дымки.

Миражи с искажениями предметов и отражениями наблюдались также при следующих обстоятельствах: при купании, когда вода теплее воздуха; на больших озерах при благоприятных атмосферных условиях; над железнодорожными рельсами, когда, наклонившись, вы видите совершенно искаженным далекий паровоз; над ровной песчаной дорогой или ровной пашней; вдоль склонов дюн, если смотреть параллельно склону; вдоль улиц города, вымощенных камнями, особенно, если взгляд скользит у самой высокой точки подъема улицы; над поверхностью льда, если воздух значительно холоднее самого льда.

## 40. Миражи над холодной водой («верхние миражи»)

Нижние миражи появляются главным образом над нагретой землей; верхние миражи, хотя и гораздо реже, наблюдаются преимущественно над морем. Они возникают, когда море значительно холоднее воздуха, так что температура нижних слоев воздуха быстро

*) Например, по определению Пеккера только $2^1/_2'$ (P e c k e r, L'Astronomie **65**, 381, 1951).

растет с удалением от поверхности моря; метеорологи называют такое распределение температуры «инверсией» (рис. 54).

Классические наблюдения великолепных «верхних» миражей были проведены при помощи телескопа на южном побережье Англии у Ла-Манша. Наблюдения проводились иногда вечером после жаркого

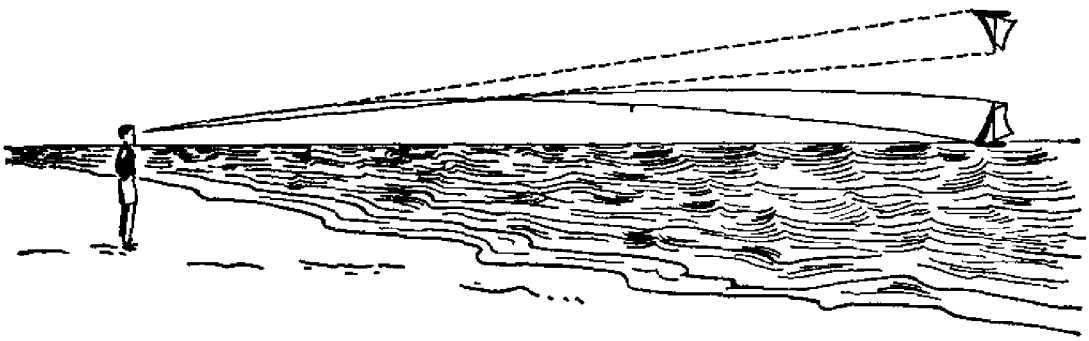


Рис. 54. Верхний мираж.

дня, иногда — во время тумана, который поднимался над морем. Верхние миражи изредка наблюдаются и в совершенно других условиях, например, весной над Балтийским морем, когда начинается оттепель.

При внезапной оттепели, когда сразу начинает таять, могут появиться миражи над замерзшими поверхностями — в это время ближайший ко льду слой воздуха оказывается холоднее, чем верхние слои. Чтобы увидеть такой мираж, нужно сильно нагнуться; взгляд наблюдателя должен скользить почти вдоль замерзшей поверхности.

Иногда искривление лучей кверху вызывает множественные отражения; в этом случае луч распространяется беспрепятственно (в противоположность нижнему отражению, где ход луча преграждается Землей), и мы видим удивительные изображения, прямые и перевернутые, изменяющиеся каждую минуту в зависимости от расстояния наблюдателя от предмета и распределения температуры в атмосфере.

## 41. Воздушные замки

Вполне авторитетные наблюдатели описали несколько случаев замечательных миражей. Это были ландшафты с городами, башнями и парапетами, поднимающимися над горизонтом. Своими все время меняющимися и исчезающими волшебными картинами они вызывали восторг, манили к себе — это была *фата-моргана*! Нет ничего удивительного, что эти миражи, прекрасные сами по себе, еще больше украшены поэзией и народными сказаниями *).

*) Интересна передача этого явления на картине Куинджи «Фата-моргана близ Oresund перед шведским берегом» (Русский музей, Ленинград).

Форел довольно часто наблюдал над Женевским озером несколько более простые формы этого явления; он подробно описал результаты своей пятидесятилетней работы *). Для опыта необходима спокойная поверхность воды шириной от десяти до тридцати километров, причем очень важно, чтобы глаз наблюдателя был на высоте от двух до четырех метров над водой. Это расстояние точно определяется из опыта. В ясные солнечные дни, когда вода теплее воздуха, Форел наблюдал четыре последовательные стадии развития миража, появлявшегося на противоположном берегу; стадии сменяли одна другую и не задерживались в одном и том же месте долее, чем на 10—20 минут.

Вот эти четыре стадии (рис. 55): *а*) мираж над теплой водой; отражение под предметом; б) необычный мираж над холодной водой — очень странное явление, когда предмет виден совершенно обычно, а отражение, находящееся внизу, чрезвычайно сжато (возможно, неустойчивая, временная переходная форма); *в*) воздушные замки; отдаленная береговая линия искажена на протяжении 10—20° и вытянута по вертикали в целый ряд прямоугольников («заштрихованная

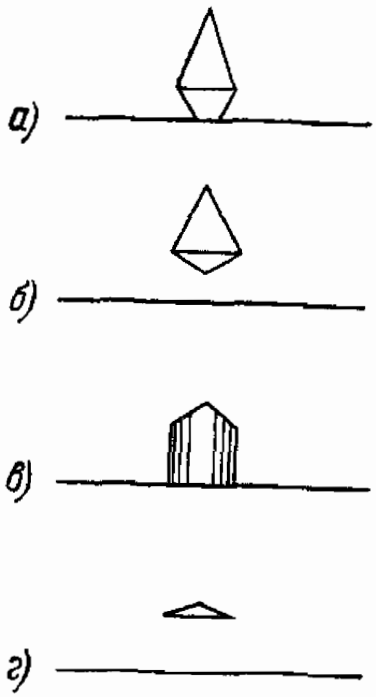



Рис. 55. Возникновение фата-морганы при переходе от преломления лучей над теплой водой к преломлению над холодной водой.

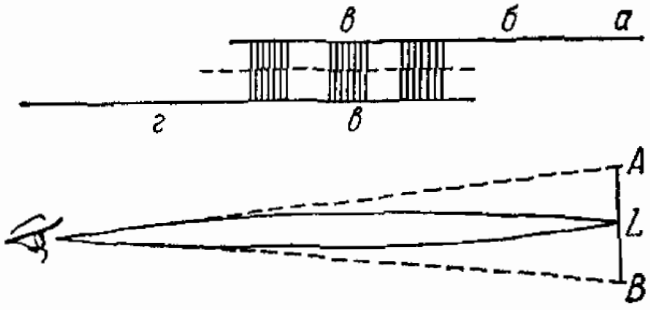



Рис. 56. Возникновение фата-морганы. Буквы в верхней части рисунка соответствуют стадиям развития фата-морганы, указанным на рис. 55.

зона»); *г*) нормальное искривление лучей над холодной водой; не видно никакого отражения, но сам объект сильно сжат в вертикальном направлении.

Верхний горизонт в стадиях *а* и *б* и нижний горизонт в стадии *г* — это границы, в которых развивается «заштрихованная зона» (рис. 56). Воздушные замки перемещаются в результате того, что преломление лучей в стадии *а* постепенно переходит в стадию *г*. Здесь ка-

*) F. A. Forel, Proc. Roy. Soc. Edinburg **32**, 175, 1912; см. также Arch. sc. phys. nat. **3**, 545, 1897; C. R. Paris **153**, 1054, 1911.

жется вполне справедливой теория о том, что плотность воздуха в такой переходной области наибольшая в слоях средней высоты. Лучи в этом случае проходят путь, который показан на рис. 56; как видно, всякая световая точка $L$ вытягивается в вертикальную линию $AB$.

Но постепенно ландшафт теряет
Свою безнадежность перед ее глазами,
И видит она как открылась даль перед нею —
Огромный светлый водный простор.
Кустарник и водные растения
Окаймили погруженный в воду ландшафт,
И они растут и тянутся вверх,
Бросая тени от своих верхушек,
Это зрелище свежо и божественно,
Это — чудесное видение Востока!
Постепенно вдали вдоль голубого озера
Вырастает город со своими набережными,
Окаймленный со всех сторон
Кольцом величественных, могучих стен,
С церквами, крышами домов, фонтанами
и башнями —
И все это купается в солнечном свете!
Суда, большие и малые,
Надувая гибкие белоснежные паруса,
Входят в гавань. Ветерь колышет
Свет на мачте, флаги и
цветные вымпелы.

(Fr. M i s t r a l, Mireio, X).

Многие, конечно, пожелают узнать, есть ли возможность наблюдать явление фата-моргана в Голландии. На голландском побережье *Северного моря нам известно, по крайней мере, два великолепных* примера этого явления.

«В прошлую пятницу (12 сентября 1917 г.) в 7 часов мы стояли втроем около геодезического знака в Шкорле. Мы стояли и смотрели на море и вдруг увидели, как вырос прямо у нас на глазах и совсем недалеко от нас город; деревья и дома имели резкие очертания и казались очень высокими. Если бы мы увидели этот город в действительности, мы бы безошибочно узнали его» *).

Другой наблюдатель этого редкого явления отметил практически все характерные черты, упомянутые Форетом. Он пишет: «В 4 часа 20 минут после обеда я вышел на берег у Зандфоорте. Меня сразу же поразила неровность горизонта. Со стороны северо-запада и запада он был заметно выше, чем на юго-западе; во многих местах было видно два горизонта, причем один располагался над другим. С одной стороны оба горизонта сливались в один на уровне более высокого западного и северо-западного горизонта, с другой стороны — они сливались в низкий горизонт юго-запада. Расстояние между

*) Z e v e n h u i z e n - D i l, Onweders 40, 46, 1919.

ними было повсюду приблизительно одинаковым и равнялось приблизительно 7′ (на расстоянии вытянутой руки оно равно 2 *мм*).

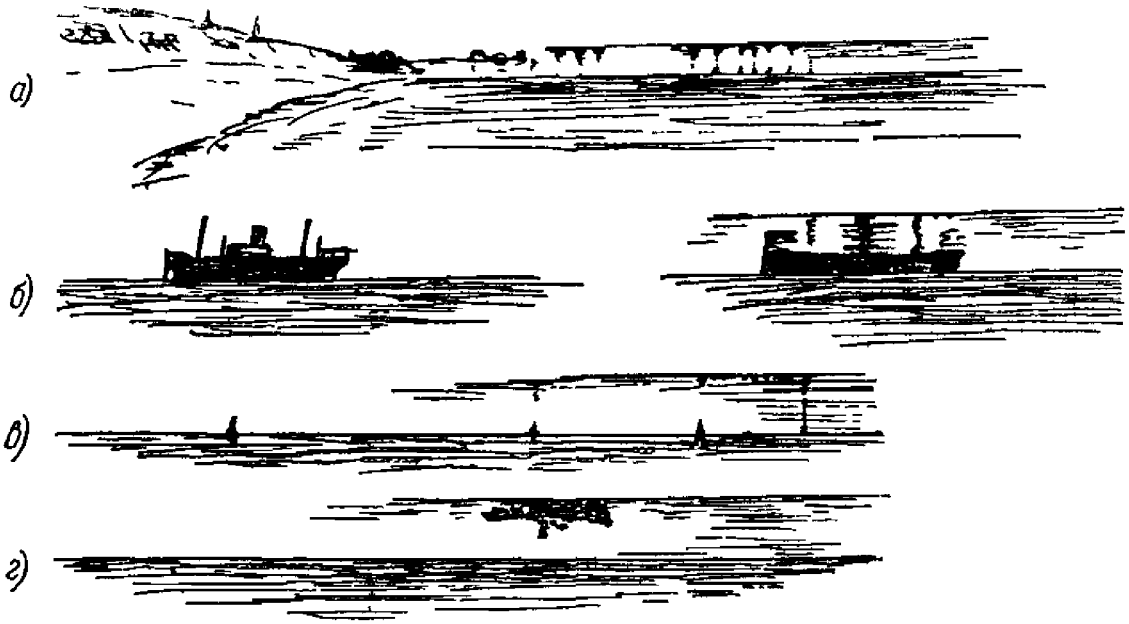



Рис. 57. Воздушные замки, наблюдавшиеся в Зандфоорте (Нидерланды): *а*) Нордвайк, Катвайк, Шевенинген; в заштрихованной зоне лес из пальмовых деревьев! *б*) Слева — корабль, отплывающий в открытое море, отражения нет; справа — область фата-морганы. *в*) Маленькие парусные лодки. *г*) Пароход находится за горизонтом и невидим; он становится видим в фата-моргане. Перевернутый мираж висит в воздухе (Hemel en Dampkring **31**, 252, 1933).

Предметы, находящиеся между этими двумя уровнями, подвергались удивительным изменениям, которые производили впечатление самых невероятных картин» *) (рис. 57).

## 42. Искажение Солнца и Луны во время восхода и захода **) (фотография IX)

Иногда, когда Солнце находится низко над горизонтом, можно наблюдать странное искажение его очертаний. Часто углы видимого сегмента закруглены, иногда кажется, что диск состоит из двух частей, соединенных вместе; порой под Солнцем оказывается полоска света, которая поднимается по мере того, как солнечный диск опускается. Бывает, что Солнце садится не за горизонт, а на расстоянии нескольких минут дуги над ним. Кажется, что такие искажения появляются чаще вечером, чем утром, и объяснение этому следует искать в метеорологических факторах (ср. § 217). В тихие безоблачные дни слои воздуха с различной плотностью меньше перемешиваются, так что искажения в очертаниях солнечного диска можно принять

*) P i n k h o f, Onweders **54**, 40, 1935; Hemel en Dampkring **31**, 252, 1933.

**) A. L. C o l t o n, Contr. Lick Obs. **1**, 1895; A. R i c c o, Mem. Spettr. Ital. **30**, 96, 1901; P r i n z, там же **31**, 36, 1902; A r c t o w s k i, там же **31**, 190, 1902; W e g e n e r, Beitr. z. Phis. d. freien Atmosph. **4**, 26, 1912; A. B r a c k e, Déformations du soleil, Mons, 1907; Publ. Astron. Soc. Pacific **45**, 270, 1933.

за предзнаменование устойчивого состояния атмосферы и, следовательно, хорошей погоды. Если Солнце слишком слепит глаза, то при наблюдении рекомендуется держать перед глазом листок серебряной или обычной бумаги с проткнутой маленькой круглой дырочкой, или темное стекло. Полевой бинокль не обязателен, хотя он несколько облегчает наблюдение. В этом случае перед глазом (но не перед объективом) можно держать кусок закопченного стекла или диафрагму с отверстием величиной с булавочную головку.

Самая интересная стадия этого явления наступает обычно лишь за 10 минут до захода (или продолжается спустя 10 минут после восхода). Обратите внимание на различные оттенки цвета солнечного диска — ближе к горизонту он темно-красный, а в верхней части постепенно становится оранжевым и желтым. Заметьте также, как вытягиваются наблюдающиеся иногда большие солнечные пятна *).

Очень интересно, хотя и трудно, сфотографировать это явление; снимки Солнца, снятые при помощи обычного фотоаппарата, оказываются слишком маленькими. Удовлетворительные фотографии можно получить лишь с помощью телескопа, у которого фокусное расстояние не менее 75 *см* и диаметр объектива от 3 до 10 *см*. Снимать

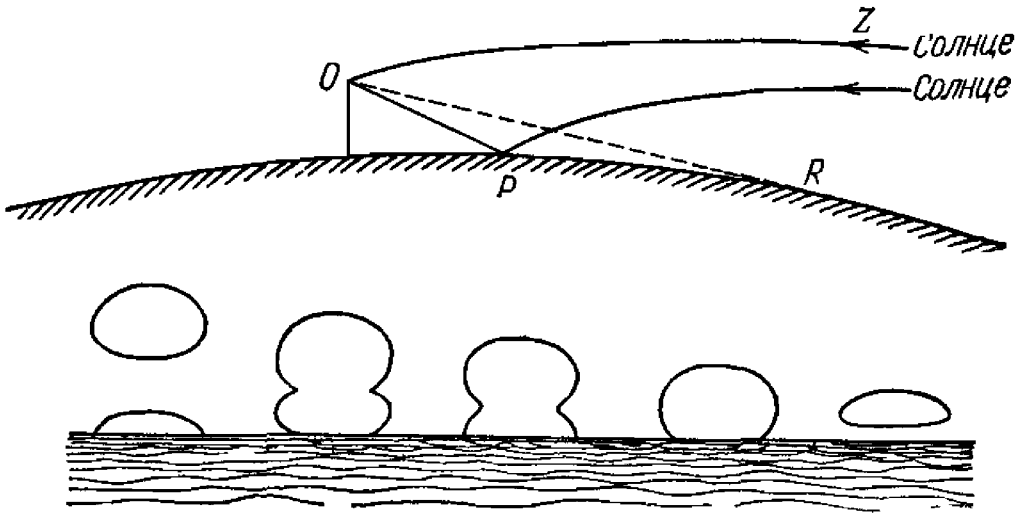



Рис. 58. Объяснение искажений формы солнечного диска, наступающих в результате миража во время заката (случай *1*).

нужно с очень короткой выдержкой — менее 1 секунды, что избавляет от необходимости передвигать телескоп за Солнцем. Пользуйтесь панхроматическими пластинками и просмотрите литературу по этому вопросу.

Оптические искажения, описанные выше, объясняются не чем иным, как обычным миражем, и здесь следует опять подчеркнуть разницу между верхними и нижними миражами. Мы будем очень недалеки от истины, если примем по Вегенеру, что луч света, исходя-

*) Havinga, Hemel en Dampkring **19**, 161, 1922.

щий от Солнца, внезапно искривляется при встрече с поверхностью разрыва.

Случай 1 (рис. 58). Тонкий слой теплого воздуха $PR$ покрывает Землю. Таким образом мы видим Солнце в направлении $OZ$, и в это же самое время под ним — его отражение в направлении $OP$, причем горизонт $OR$ лежит между ними. В то время как Солнце садится за видимый горизонт $OP$, из-за него встает сплющенное «противосолнце», и оба диска соединяются в том месте, где вот-вот должно исчезнуть действительное Солнце ($OR$). Оба диска все больше и

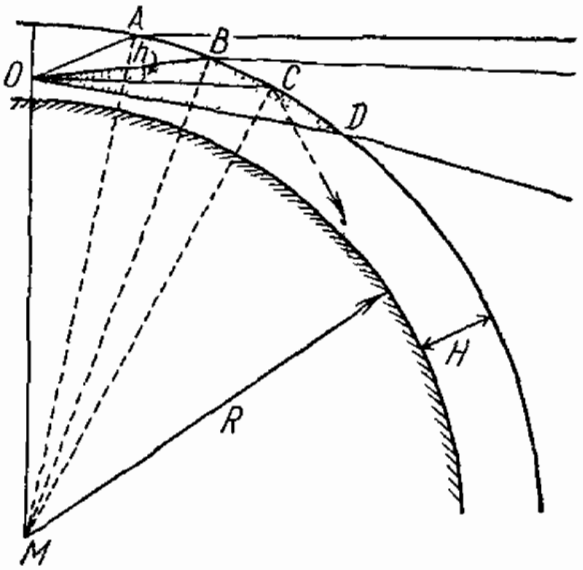



Рис. 59 Объяснение искажений формы солнечного диска при закате, вызываемых миражем (случай *2*).

больше сливаются, приобретая очертания, напоминающие воздушный шар и т. п.

Случай 2 (рис. 59). Теперь предположим, что воздух около самой Земли холодный, а выше него лежит теплый слой воздуха

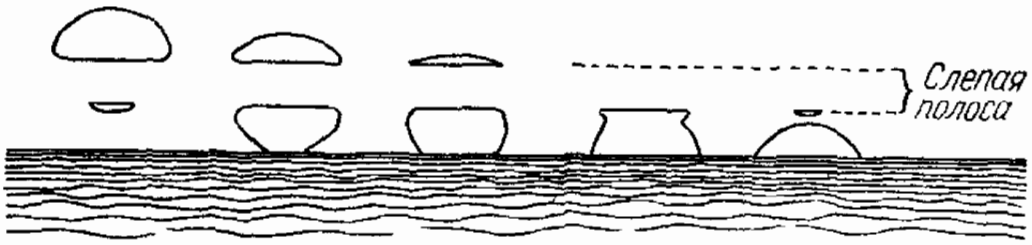



Рис. 60. Искажение очертаний Солнца при наличии одной поверхности разрыва.

(инверсия.) Точка $M$ — центр Земли, вокруг нее начерчены две дуги, изображающие уровень моря и границу $ABCD$ между теплым и холодным воздухом. Вообразим теперь, что наблюдатель $O$ направляет свой взор все более и более горизонтально. В направлении $OA$ взгляд касается верхнего края Солнца; в направлении $OB$ он видит другую точку, расположенную ниже, но его взгляд по от-

ношению к поверхности разрыва более наклонен. В горизонтальном направлении $OC$ он падает на этот слой под таким большим углом, что луч зрения изгибается и не покидает Землю. Если наблюдатель находится над поверхностью Земли, он сможет даже заглянуть вниз под небольшим углом; если он смотрит в направлении $OD$, угол падения его взгляда на поверхность разрыва уменьшается и опять оказывается настолько малым, что луч зрения уходит за пределы Земли. Поэтому внутри заштрихованного угла по обе стороны от горизонтального направления ни один луч, попадающий на Землю, не достигает наблюдателя; он видит «слепую полосу» высотой $2h$ (рис. 60).

Из всех возможных хорд (см. рис. 59), проходящих через точку $O$, горизонтальная хорда $OC$ пересекает окружность под наименьшим углом. В самом деле, в треугольнике $MOB$

$$\frac{\sin \angle OBM}{OM} = \frac{\sin \angle MOB}{MB},$$

так что

$$\sin \angle OBM = \frac{R}{R+H} \sin (90^\circ + h) = \frac{R}{R+H} \cos h.$$

Из этого следует, что угол $OBM$ принимает максимальную величину, когда $h=0$. В предельном случае полного отражения

$$\sin \angle OBM = \frac{1}{n},$$

где $n$ — показатель преломления одного слоя воздуха по отношению к другому. Обозначив $\frac{H}{R}$ через $\varepsilon$, $n-1$ через $\delta$ и заменив $\cos h$ его приближенным выражением $1 - \frac{1}{2}h^2$, мы получим:

$$h = \pm \frac{\sqrt{2(\delta - \varepsilon)}}{n}$$

или приблизительно $\pm \sqrt{2(\delta - \varepsilon)}$, так как $n$ практически равно 1.

Таким образом, «слепая полоса» простирается на столько же над горизонтом, на сколько и под ним (двойной знак перед корнем). Для $H=55$ м $\varepsilon = 78 \cdot 10^{-7}$, если принять $\delta = 100 \cdot 10^{-7}$, то $h = \pm 0{,}021$ радиана $= \pm 7'$; таким образом, ширина «слепой полосы» равна $14'$. Вообще говоря, следует учесть также обычное земное искривление лучей, однако в данном случае нас больше всего интересуют основные характерные черты рассматриваемого явления.

Рассматривая таким образом строение атмосферы, мы выяснили, что Солнце заходит прежде, чем оно достигает фактического горизонта — как только оно попадает в «слепую полосу». Если наблюдатель находится на вершине холма или на палубе корабля, он, вероятно, сможет увидеть нижний край Солнца, появляющийся под «слепой полосой». Изображения, конечно, будут искажены в вертикальном направлении; над «слепой полосой» сжаты по вертикали, под ней — вытянуты.

Иногда край Солнца имеет несколько небольших зазубрин, которые, по-видимому, указывают на наличие более чем одной поверхности разрыва в атмосфере (рис. 61). Иногда одна из таких выемок становится настолько глубокой с обеих сторон, что от верхушки Солнца как бы отрезается целая полоса. На какой-то момент эта полоса остается как бы висящей в воздухе, затем сокращается и исчезает; в этом случае часто можно увидеть замечательное явление — так называемый зеленый луч. Иногда еще одна полоска как бы отрезается от Солнца и т. д. (рис. 61).

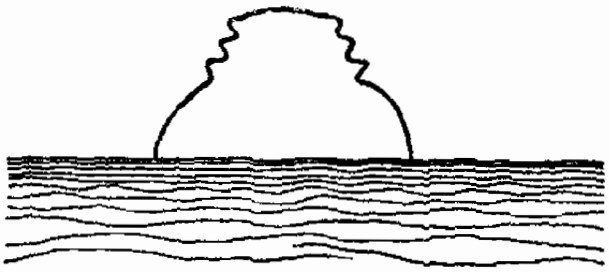


Рис. 61. Искажения очертаний Солнца при наличии нескольких поверхностей разрыва.

Ночью мы можем наблюдать искажение Луны. Особенно сильные искажения появляются, когда Луна имеет форму тонкого серпа.

## 43. Многократные изображения

В предыдущих изданиях этой книги упоминалось о двух наблюдениях многократных изображений лунного серпа. Эти изображения располагались друг подле друга и друг над другом, были удивительно резки и не показывали изменений формы (рис. 62). Расстояние между изображениями было так велико, что я уже не мог здесь ссылаться на отражение в воздухе и даже думал об аномальном образовании изображения в глазе наблюдателей. Однако я ошибался! Природа всегда богаче в своих возможностях, чем мы думаем. Недавно один наблюдатель видел около Солнца и над ним семь изображений Солнца, неискаженных и резких. На этот раз явление было сфотографировано отчетливо и убедительно *). Солнце было в 10° над горизонтом, явление оставалось видимым не больше трех минут. Семь побочных солнц были синеватыми, настоящее Солнце — оранжевым. Объяснение явления искали в аномальном искривлении световых лучей. Мне такое объяснение кажется неверным — невозможно представить себе, как форма изображений остается неискаженной.

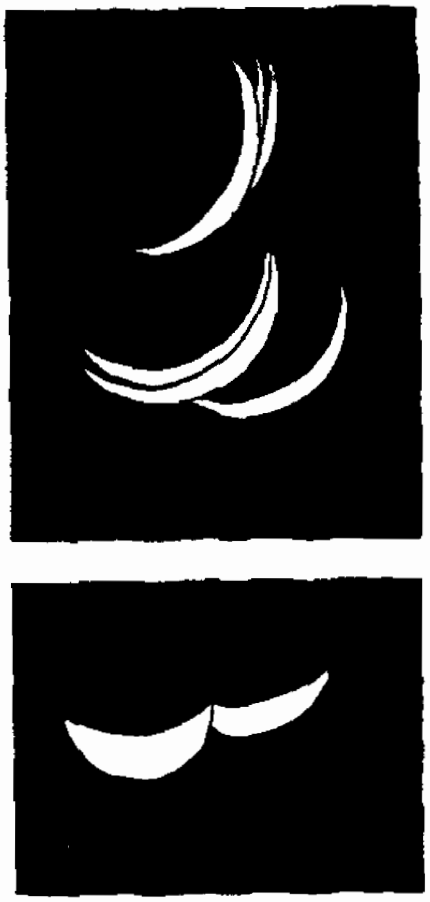


Рис. 62. Множественные лунные серпы.

*) Richard, Météorologie **4**, 301, 1953.

## 44. Зеленый луч *)

*«Видели ли вы когда-нибудь заходящее Солнце на горизонте? — Да, конечно! — Следили ли вы, как оно касалось линии горизонта, а потом вовсе исчезало за ним? — Вероятно, да! — Но заметили ли вы, как появляется и гаснет последний солнечный луч, когда воздух освобождается от тумана и становится прозрачным? — Вероятно, нет! — Итак, если представится видеть это явление — оно бывает очень редко,— то обратите внимание на то, что этот последний луч будет не красным, а зеленым. Да, да, он будет иметь чудесный зеленый цвет, т. е. такой зеленый, который не сможет создать ни один художник на своей палитре. Подобный зеленый цвет не удается встретить нигде в природе, ибо его нельзя найти в растительном мире, несмотря на все множество и разнообразие его цветов и оттенков, его не встретить и у самых ярких морей. Если есть зеленый цвет в раю, то он не может быть иным, ибо это настоящий цвет надежды!»*

(*Жюль Верн, Зеленый луч.*)

По старинной шотландской легенде, всякий, кто хоть однажды видел зеленый луч, никогда не совершит ошибки в сердечных делах. На острове Мэн зеленый луч называют «живым светом».

Зеленый луч можно заметить гораздо чаще, чем думали раньше. Однажды во время морского путешествия из Явы в Голландию мне удалось наблюдать зеленый луч более десяти раз. Удобнее всего наблюдать это явление в море, стоя на палубе корабля или на берегу. Правда, зеленый луч можно увидеть и над землей, если горизонт достаточно далек. Иногда замечают зеленый луч, когда Солнце скрывается за горами или за резко очерченной тучей. Виден он и над горами и обычными облаками, при условии, что их высота не превышает 3° над горизонтом. В нескольких случаях зеленый луч удавалось увидеть и на удивительно малом расстоянии. Рикко рассказывает, как он однажды стоял у края тени скалы, находящейся довольно близко от него; слегка поворачивая голову то вправо, то влево, он сколько угодно раз мог видеть зеленый луч **). Уитнелл заметил зеленый луч над стеной, расположенной в 300 *м*, Нэйланд и Барбер—в 400 *м*, однако все такие случаи очень редки ***).

Все, кому довелось видеть зеленый луч, считают, что чаще всего он появляется в такой вечер, когда Солнце ярко светит до самого момента заката; если при закате Солнце очень красное, то зеленый луч почти никогда не наблюдается.

---

*) Fischer, Pop. Astr. **29**, 1931; Mulder, The «green ray» or «green flash» (The Hague, 1922); F. Kuiper, De Groene Straal (Diss., Utrecht, 1926). Антонов, Изв. Всесоюзн. геогр. об-ва **86**, 102, 1954. В перечисленных работах собрана и рассмотрена обширная литература по этому вопросу. Хорошие цветные рисунки помещены в Ann. Hydr. **65**, 489, 1937.

**) Mem. Spettr. Ital. **31**, 36, 1902.

***) Nature **156**, 146, 1954; Hemel en Dampkring **33**, 219, 1935.

Обычно при наблюдениях зеленого луча сильно помогает театральный или полевой бинокль и в еще большей степени — телескоп. Необходимо, однако, остерегаться серьезного повреждения глаз. Биноклем можно пользоваться лишь за несколько секунд до захода Солнца. Не следует также слишком рано смотреть простым глазом на последний сегмент солнечного диска; отвернитесь, пока кто-нибудь не подаст вам сигнал, что наступил нужный для наблюдения момент. Еще проще заставить блик быстро менять свое место.

Явление зеленого луча очень непродолжительно и длится всего несколько секунд. Однажды мне удалось наблюдать зеленый луч в течение 20 секунд — во время заката я взбегал по склону плотины в Зандфоорте высотой 6 *м*. В зависимости от скорости моего шага луч менял окраску — становился то голубее, то белее. Продлить наблюдение можно и на корабле, переходя все выше с одной палубы на другую. Нэйланду движение корабля, на котором он плыл, позволило наблюдать зеленый луч несколько раз подряд в один и тот же вечер. В одном случае, когда отмечалась необычайно сильная кривизна лучей, зеленый луч был виден в течение 10 секунд и даже более. Португалец Гаго Континхо неограниченное время мог видеть зеленый луч, создаваемый светом далекого маяка. Во время экспедиции Бэрда на Южный полюс зеленый луч был виден в течение 35 минут, пока Солнце в первый раз в конце полярной ночи выходило из-за горизонта, двигаясь точно вдоль его линии.

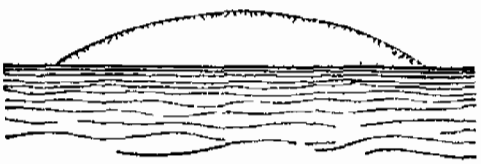


Рис. 63. Зеленый сегмент.

Явление зеленого луча имеет три формы: а) *зеленый край*, который, как правило, всегда можно различить вверху солнечного диска и который становится все шире по мере того, как Солнце спускается ближе к горизонту; в то же время нижний край Солнца становится красным; б) *зеленый сегмент* (рис. 63). Сегмент заходящего Солнца становится зеленым по краям. Постепенно зеленый цвет смещается к центру сегмента. Зеленый сегмент виден невооруженным глазом около секунды, а с помощью полевого бинокля иногда в течение 4—5 секунд; в) *зеленый луч* (рис. 64). Это явление, также наблюдаемое простым глазом, случается чрезвычайно редко. Внешне зеленый луч похож на пламя, вырывающееся из-за горизонта как раз в тот момент, когда исчезает Солнце.

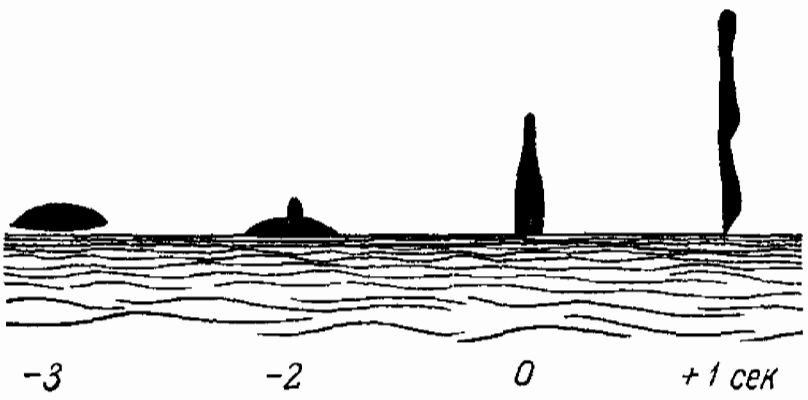



Рис. 64. Зеленый луч. Время исчисляется с момента захода Солнца.

Хороший наблюдатель описал, как над погружающимся краем Солнца показался и исчез «хохолок», окрашенный в зеленый цвет, сменившийся светло-зеленой вспышкой *). Наблюдаются очень изменчивые формы явления.

Во всех трех случаях цвет луча обычно изумрудный, реже это желтоватый цвет **), иногда голубой или даже фиолетовый. Однажды было замечено, как цвет менялся из зеленого в голубой и затем в фиолетовый, причем все явление длилось несколько секунд.

Сейчас уже можно не сомневаться в правильности объяснения зеленого луча. Солнце стоит низко, так что его белые лучи должны пройти длинный путь через атмосферу. Бо́льшая часть желтого и оранжевого света поглощается водяными парами и молекулами $O_4$ (полосы поглощения лежат как раз в этой спектральной области). Фиолетовый свет в значительной мере ослаблен в результате рассеивания (ср. § 189). Остаются лишь зелено-голубые и красные лучи, что подтверждается спектроскопом ***) (рис. 65).

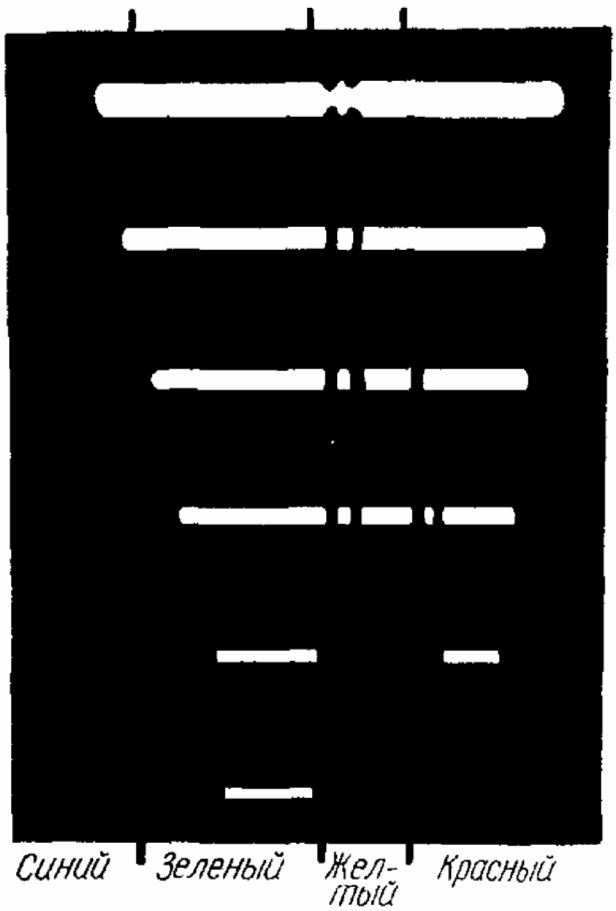



Рис. 65. Спектр заходящего Солнца по наблюдениям Диквела (Hemel en Dampkring **34**, 261, 1936).

Атмосфера в нижних слоях плотнее, чем вверху, так что лучи света по пути через воздух искривляются (ср. § 36); у красных лучей искривление несколько меньше, у зеленых и голубых лучей несколько больше, поскольку они больше подвержены преломлению. Все это приводит к тому, что мы видим два солнечных диска, частично покрывающих друг друга, причем зелено-голубой диск немного выше, чем красный. Вот почему снизу солнечного диска появляется красный край, а вверху — зеленый (рис. 66). Теперь понятно, почему у края сегмент солнечного диска зеленый, когда Солнце стоит низко, и почему красная часть постепенно исчезает за горизонтом, в то время как зеленый цвет покрывает весь оставшийся

*) Шаронов В. В., Астрон. Цирк. № 108, 9, 1950.

**) Hemel en Dampkring **19**, 83, 1921.

***) N. Dijkwel, Hemel en Dampkring **34**, 261, 1936. При значительном рассеянии зелено-голубой цвет также исчезает; вот почему зеленый луч невидим, если садящееся Солнце темно-красного цвета. Спектр был сфотографирован и обработан Якобсоном (T. S. Jacobsen, J. Roy. Astron. Soc. Canada **46**, 93, 1952).

сегмент. Во многих случаях, однако, преломление около горизонта бывает настолько сильным, что зеленый сегмент достаточно хорошо различим в течение более длительного времени. Если в это время появляются миражи, то явление развивается в своего рода пламя или отдельный луч.

Рис. 66. Как возникает зеленый луч.

Эта точка зрения была бы подтверждена, если бы зеленый луч и зеленый сегмент были совершенно не видны, когда море теплее воздуха и уменьшение плотности и искривление лучей незначительны. Имеются основания полагать, что это действительно так *).

Отмечают, что зеленый сегмент особенно хорошо виден, когда в нижних слоях воздуха налицо все признаки миража: нижний

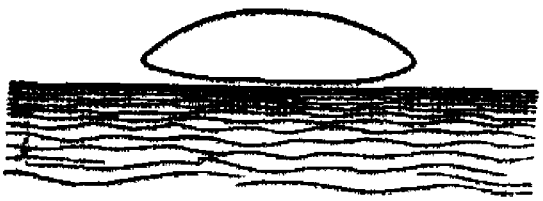


Рис. 67. У последнего сегмента заходящего диска Солнца закругленные кверху края. Есть надежда, что появится зеленый луч!

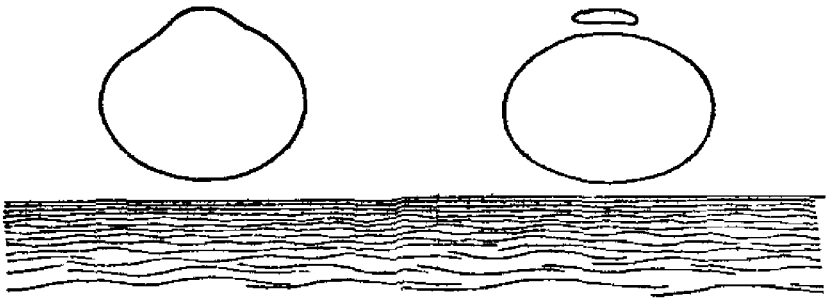


Рис. 68 Как возникает зеленый луч при отделении верхней части садящегося Солнца.

край сегмента не прямой, углы его несколько загнуты кверху (рис. 67) **).

Когда диск Солнца как бы зазубривается с боков, можно заметить, как иногда у его верхушки отрывается полоса, которая исчезает затем в ясном зеленом блеске. Это удивительно красивое зрелище ***) (рис. 68, ср. рис. 61). Приведем здесь другой факт, подчеркивающий значительную роль, которую играет в появлении зеленого луча *аномальное* преломление. Два раза зеленый луч был виден

*) R. W. Wood, Nature **121**, 501, 1928.
**) Nature **111**, 13, 1929
***) Ср. В М. Чернов, Астрон. Цирк , № 120, 8, 1951.

лишь с одной палубы корабля, но не с других. Это говорит о большой роли высоты, с которой проводятся наблюдения *).

Измерения спектра собственно зеленого луча показали, впрочем, что зеленый свет здесь существенно интенсивнее, чем в спектре Солнца, полученном в предшествующий момент. Это можно объяснить лишь аномальной кривизной лучей. Однако находятся компетентные наблюдатели, которые настойчиво утверждают, что для появления зеленого луча вполне достаточно *обычного* земного преломления лучей **).

Таким образом, главная проблема, которую необходимо решить в связи с зеленым лучом, такова: каково должно быть преломление, чтобы явление имело наблюдаемую интенсивность зеленого луча. Для этого достаточно в течение нескольких дней определять точное время захода Солнца, наблюдая в то же время за появлением зеленого луча. Разность между наблюденным и вычисленным моментами послужит хорошим указателем отклонения кривизны луча от нормальной (ср. § 36).

Раньше зеленый луч принимали за физиологический последовательный образ (в дополнительных цветах) садящегося красного Солнца (§ 101). Это предположение опровергается тем фактом, что зеленый луч часто появляется и при восходе Солнца, хотя в этом случае обычно трудно предугадать, в какой точке ожидать появления света. При восходе за точку, в которой должно появиться Солнце, следует принять самую яркую точку горизонта; можно также использовать иззаоблачное сияние или фигуру Гайдингера (§§ 197, 188). Другой довод в пользу наших рассуждений таков: зеленый луч виден лишь при условии, что расстояние до горизонта достаточно велико. Хотя это и не затрагивает ни в какой степени последовательный образ, это, естественно, очень важно в отношении искривления лучей.

Зеленый луч удалось, правда, с большим трудом, сфотографировать на пластинках автохром ***).

Очень редко удавалось заметить зеленый луч от Луны или от Венеры; однажды был замечен зеленый луч от Юпитера. Саврухин видел зеленый луч от Венеры почти каждый день в течение определенного периода, когда планета заходила за горный хребет, располагавшийся в 50 *км* от наблюдателя, в 4° над горизонтом ****). Наблюдения ван ден Боша относятся к высоте над горизонтом 7°.

---

*) Meteor. Zs. **49**, 1932 S. W Visser en F. Th Verstelle, Hemel en Dampkring **32**, 81, 1934 Такое наблюдение предпочтительно проводить одному и тому же лицу, переходящему с палубы на палубу.

**) Proc Roy. Soc. **126**, 311, 1930.

***) Ряд прекрасных цветных снимков был сделан в последние годы обсерваторией в Кастель Гандолфо.

****) Астрон. Цирк., № 120, 8, 1951.

Описан случай, когда во время захода Венеры над морем отражение ее поднималось по направлению к самой планете; в момент, когда планета и ее отражение совпали, цвет внезапно изменился и из красноватого превратился в зеленый.

### 45. Зеленый прибой

На берегу Суматры было замечено, что на далеком горизонте пенистые гребешки волн казались зелеными, причем только у более низких волн; гребешки более высоких волн были белыми как обычно. Само море было серым, и линия горизонта казалась сильно изогнутой. По-видимому, это явление идентично зеленому лучу; сверкающие гребешки более низких волн соответствуют самому краю садящегося Солнца.

### 46. Красный луч *)

Из объяснения происхождения зеленого луча можно сделать вывод о существовании и *красного луча*, который можно увидеть, например, когда Солнце зашло за плотную, резко очерченную по краям, тучу около горизонта и самый нижний край диска выглядывает из-под тучи. Такую картину, правда, крайне редко, удавалось наблюдать. Красный луч еще короче по длительности, чем зеленый.

Уитнелл, видевший зеленый луч в отверстие стены на расстоянии 300 *м* от него, в этих же условиях наблюдал и красный луч.

### 47. Мерцание земных источников света **)

Явление, которое известно как мерцание или мигание, очень хорошо заметно над жаровнями или печами, в которых у нас обычно варят асфальт для улиц. Все предметы в отдалении начинают трепетать и как бы струиться в воздухе — иногда так сильно, что делаются неузнаваемыми, а воздух даже перестает казаться прозрачным. Если взглянуть на отдаленные предметы над котлом паровоза, то все они начинают дрожать. То же происходит и над раскаленной железной крышей. Такую же картину можно наблюдать над сжатым полем или полосой песка, если они сильно нагреты Солнцем.

Лучше всего явления мерцания можно наблюдать на ярких и блестящих объектах, таких, как стволы берез, белые столбы, площадки белого песка, садовые шары или стекла далеких окон, освещенные Солнцем. Летом или в солнечные весенние дни мерцают же-

*) Nature **94**, 61, 1914. Прекрасное описание наблюдения красного луча в бинокль во время исчезновения больших солнечных пятен на закате при заходе Солнца см. W. M. Lindley, J. Brit. Astr. Ass. **47**, 298, 1937.

**) Meteor. Zs. **9**, 138, 1892.

лезнодорожные рельсы; они уже не кажутся прямыми, а змеятся и сплетаются в отдалении. Если приложить голову к Земле, то мерцание увеличивается; можно увидеть воздушные «струйки», гонимые ветром. Такие «волны» бывают даже выше, чем волны на море. Если смотреть в бинокль, то, пока ярко светит Солнце, невозможно хорошо рассмотреть отдаленные предметы (особенно если посмотреть в направлении против Солнца). Зимой напрактиковавшийся глаз легко заметит по дрожащим и вибрирующим отдаленным предметам, как теплый воздух поднимается над крышами (Оудеманс).

«Так воздух, сквозь который мы смотрим на звезды, пребывает в постоянном дрожании, как это видно *из дрожащего движения теней от высоких башен* и из мерцания неподвижных звезд» (Ньютон, «Оптика»). Кто из читателей замечал это?

Все эти явления объясняются искривлением световых лучей в потоках теплого воздуха, который подобно небольшим фонтанам поднимается от нагретой Земли. На высоте не более 2 *м* теплый воздух в значительной степени уже смешивается с холодным воздухом, и «струйки» становятся меньше.

Часто на гладкой белой стене, освещенной Солнцем, видны поднимающиеся над подоконниками воздушные струйки, отбрасывающие тончайшие тени, похожие на дымок. Параллельность световых лучей нарушается этими воздушными потоками, в одних местах потоки вырисовываются более ясно, в других — менее. Эта картина напоминает картину прохождения лучей через волнующуюся воду или через неровное оконное стекло (§ 28—30), однако искажения здесь слабее. Очевидно, мерцание будет тем больше, чем толще слой неравномерно нагретого воздуха, сквозь который мы смотрим. Огни, находящиеся в нескольких километрах от нас, начинают как бы мигать; по мере того как мы приближаемся к ним, мигание уменьшается и в конце концов совершенно исчезает. Стоящий на дороге автомобиль отражает солнечный свет как сверкающий бриллиант: на расстоянии 500 *м* он как бы мерцает; в 200 *м* отражающийся от автомобиля свет становится более постоянным, мерцание уменьшается и по мере приближения прекращается вовсе.

Наблюдения показали, что мерцание в сильной степени обусловлено б л и з к и м и к г л а з у участками пути светового луча. Подобным же образом стекла очков действуют сильнее всего, когда они находятся около глаз: если вы положите очки на страницу книги, вы увидите, что стекла не изменяют размера букв; однако, приближая очки к глазам, вы замечаете, что величина буквы меняется — увеличивается или уменьшается — причем изменения будут тем больше, чем ближе к глазам оказываются очки. Мерцание возникает также в значительной мере из-за изменений температуры воздуха поблизости от наблюдателя. Это подтверждается таким фактом: если солнечное излучение встречает на пути преграду в виде облака,

располагающегося таким образом, что оно затеняет свет Солнца в непосредственной близости от наблюдателя, мерцание прекращается почти немедленно и, наоборот, мерцание вновь появляется, как только облако проходит мимо. Трудно предполагать, что температура поверхности Земли очень быстро отзывается на любое изменение освещенности, но от сухих листьев, былинок травы и отдельных пылинок мы можем этого ожидать. Разве с такой же быстротой убывает мерцание над гравием железнодоржных насыпей, с какой пробегают над ним тени облаков? Наблюдая мерцание систематически из одного и того же места, можно проследить, как оно меняется с погодой. Обычно мерцание гораздо менее выражено при облачном небе (общая облачность означает, что в е с ь путь светового луча затенен в той или иной степени). Мерцание бывает довольно слабым перед восходом Солнца; вскоре после восхода оно увеличивается, достигает максимума около полудня и идет на убыль к 4 или 5 часам. Правда, следует отметить, что иногда этот процесс протекает по-другому.

Мерцание можно наблюдать не только над песком или почвой, или над домами, но также и над поверхностью воды, снега, над листьями деревьев. Все это доказывает, что температура всех этих объектов, зависящая от солнечного излучения, в конце концов может отличаться от температуры воздуха. При входе в порт или двигаясь вдоль берегов Ла-Манша или Мессинского пролива, очень интересно наблюдать с борта корабля мерцающие ряды фонарей на отдаленных бульварах набережных.

Иногда цвет мерцающего земного источника света меняется, однако это возможно лишь в том случае, когда источник света расположен далеко от нас. В одном случае было отмечено явное изменение цвета фонаря, находящегося не более чем в 5 *км* от наблюдателя*).

## 48. Мерцание звезд **)

Обратите внимание на то, как мерцает Сириус или какая-либо другая яркая звезда, когда она находится около горизонта. Если смотреть на такую звезду в телескоп, можно заметить ее легкое *дрожание*. Если смотреть простым глазом, то видно, как меняется *яркость* звезды, а также ее *цвет*.

Конечно, мерцание звезд, которое мы наблюдаем,— это не результат изменений, происходящих на самих звездах. Это явление можно объяснить так же, как и мерцание земных источников света (§ 47). Изменения положения звезды вызываются искривлениями

---

*) Hemel en Dampkring **30**, 130, 1932.

**) J. H o u t g a s t, Hemel en Dampkring **34**, 169, 1936. Более подробно см. у Пернтер-Экснера, а также Handbuch der Geophys. $VIII_1$. Дискуссия см. в Quart. J. Meteor. **80**, 241, 1954.

световых лучей в потоках холодного и горячего воздуха (в атмосфере всегда имеется и горячий и холодный воздух), особенно в тех местах, где теплый слой воздуха проходит над холодным и образует воздушные вихри (рис. 69). Изменения в яркости возникают потому, что неправильно отклоняющиеся лучи света в некоторых местах над поверхностью Земли концентрируются, а в других местах оказываются сравнительно редкими. Вся картина постоянно смещается (например, из-за ветра), и наблюдатель оказывается то в более, то в менее ссвещенной области. Изменение в цвете следует приписать небольшой дисперсии при *нормальном* земном искривлении лучей, в результате которой лучи от звезды проходят несколько различный путь в атмосфере в соответствии с их цветом. Расчет показывает, что для звезды на высоте 10° над горизонтом расстояние между фиолетовыми и красными лучами должно составлять 28 *см* на высоте 2000 *м* и 58 *см* на высоте 5000 *м*. Потоки воздуха в общем довольно малы, и часто может случиться, что фиолетовый луч, пройдя через воздушную струю, окажется преломленным, а красный луч пройдет без отклонений (рис. 70). Поэтому моменты, когда звезда становится ярче или слабее в результате мерцания, различны для разных

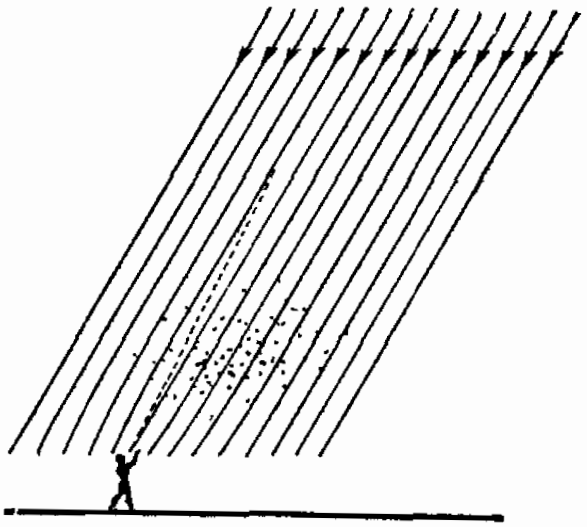


Рис. 69. Из-за неоднородностей в атмосфере световые лучи от звезды изгибаются; возиикает мерцание. В этом случае наблюдатель видит звезды смещенными кверху и более яркими.

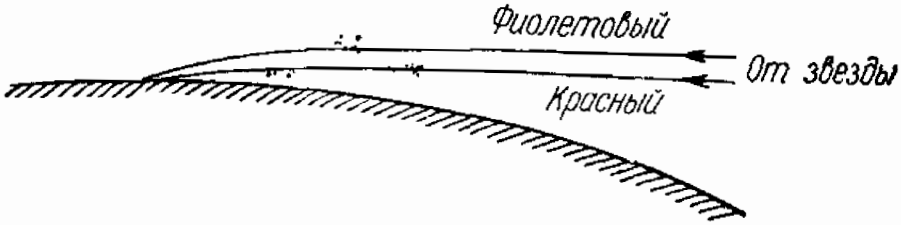



Рис. 70. Возникновение окраски при мерцании звезд.

цветов. В последнее время выяснилось, что при мерцании играет роль и дифракция, особенно когда дело касается маленьких воздушных струй на большой высоте.

Меньше всего мерцание заметно у зенита: там при спокойной атмосфере можно лишь изредка заметить мерцание ярких звезд. Чем ближе звезды к горизонту, тем больше они мерцают. Это происходит потому, что здесь нам приходится смотреть сквозь более толстый слой воздуха, и, таким образом, наш взгляд пронизывает большее число воздушных струй (см. рис. 69). Вы никогда не заметите

изменений в цвете звезд, находящихся на высоте больше 50°, однако звезды, находящиеся ниже 35°, часто меняются в цвете. Красивее всех мерцает яркий Сириус, видимый в зимние месяцы довольно низко над горизонтом.

Звезда обычно мерцает так часто, что трудно сразу понять — что же происходит в действительности. Однако близорукий человек может прекрасно изучить мерцание, держа свои очки в руке и слегка двигая их перед глазами в плоскости их стекол. При этом звезда как бы вытягивается в короткие линии. Удобнее двигать очки кругообразным движением; немного потренировавшись, можно научиться делать это плавно, без рывков (3—4 вращения в секунду). Вследствие инерции зрительного восприятия (§ 93), можно увидеть распределенными по окружности все последовательные изменения яркости и цвета звезды. В случае сильного мерцания это представляет собой замечательное зрелище! Иногда в полоске света, образованной звездой, появляются темные пятна. Это указывает на то, что в такие моменты свет от звезды к нам совсем не поступает. Рассмотрев, во сколько различных цветов окрашены полосы по окружности, можно подсчитать, сколько раз в секунду меняется цвет. Этот метод основан на том, что стекло от очков выполняет функцию не только линзы, но также и слабой призмы (когда вы смотрите не через центр стекла).

Существуют другие способы анализа явления мерцания *): 1) человек с нормальным зрением может использовать слабые вогнутые очки; для этого ему придется фиксировать глаза так, как если бы звезда помещалась поблизости от него; 2) можно смотреть в театральный бинокль, слегка по нему постукивая; 3) можно наблюдать отражение звезды в карманном зеркале, поворачивая зеркало на малые углы; 4) можно просто переводить взгляд около звезды (впрочем, последнее достигается путем большой тренировки, ср. § 91).

Имеется и очень простой метод наблюдения, который дает возможность судить о размерах воздушных потоков **). Посмотрите на ярко мерцающую звезду, слегка сведя глаза вместе, т. е. как бы посмотрите на предмет, находящийся более или менее на одной прямой со звездой на расстоянии примерно полутора метра от вас. Теперь вы увидите не одну, а две звезды, и эти две звезды мерцают неодновременно, потому что оба глаза находятся так далеко друг от друга, что струя воздуха, проходя мимо одного глаза наблюдателя, не оказывает влияния на другой глаз. Таким образом, большинство воздушных струй должно быть меньше 7 *см* толщиной, т. е. меньше расстояния между глазами.

*) Phil. Mag. **13**, 301, 1857.

**) Р. В у д, Физическая оптика, Л.— М., 1936. Для выполнения этого интересного опыта нужно лишь научиться управлять своим взглядом!

Очень красиво мерцают Плеяды; звезды в этой группе расположены близко друг к другу, и согласованность их мерцания дает нам возможность различить отдельные воздушные струи, проходящие перед нами.

Посмотрите в один из февральских или мартовских вечеров на Сириус, который в это время сверкает ярче обычного. Понаблюдайте за ним через запотевшее оконное стекло. Вы заметите, что поверхность стекла освещена по-разному, но яркость меняется одновременно по всей освещенной поверхности. Заметим, что наши глаза более чувствительны к изменениям освещенности поверхности, чем к изменениям блеска яркой световой точки.

## 49. Как измерить мерцание звезд?

1. Если вы не знаете, каким образом измерить то или иное явление, всегда для начала можно воспользоваться произвольной качественной шкалой. Немерцающую звезду я принимаю за нуль; звезду с наисильнейшим мерцанием, которая видна вблизи горизонта, принимаю за 10; промежуточные состояния между этими двумя отмечаются остальными цифрами. Такие предварительные шкалы оказывались удивительно полезными при развитии всех естественных наук. Привыкают к обозначениям такой шкалы быстрее, чем этого можно было бы ожидать, а вскоре находится способ проградуировать эту качественную шкалу и количественно.

2. Другим простым способом измерения турбулентности воздуха является определение высоты над горизонтом, на которой исчезают изменения цвета, или высоты, на которой мерцание становится практически незаметным.

3. Число изменений яркости в одну секунду, которое определяется при вращательном движении очков, также дает грубый критерий для измерения мерцания (ср. § 48).

## 50. Когда звезды больше всего мерцают? *)

Сильное мерцание звезд доказывает, что атмосфера неоднородна, что в ней перемешаны слои воздуха различной плотности. Поскольку, однако, эта неоднородность атмосферы обычно связана с определенными метеорологическими условиями, многие думают, что мерцание связано с определенной погодой.

Обычно мерцание увеличивается при низком атмосферном давлении, низкой температуре, большой влажности, больших искривлениях изобар и при большом изменении давления с высотой, причем

---

*) Dufour, Phil. Mag. **19**, 216, 1860; Bigourdan, C. R. Paris **160**, 579, 1915; J. N. Dörr, Meteor. Zs. **32**, 153, 1915 и др.

мерцание бывает гораздо интенсивнее при ветре нормальной силы, чем при ветре очень слабом или очень сильном. Таким образом, спокойствие атмосферы или ее движение зависят от такого большого числа сложных факторов, что в настоящее время невозможно использовать явление мерцания звезд для предсказания погоды.

Интересно отметить, что мерцание становится сильнее, если звезда находится поблизости от облаков; следовательно, в этом случае возникают слои воздуха различной температуры.

Говорят также, что мерцание увеличивается в сумерках. Это может оказаться или физиологической оптической иллюзией, или следствием особых атмосферных условий, которые имеют место в это время. Некоторые даже утверждают, что мерцание вызывается северным сиянием, однако это трудно понять, учитывая большую высоту (свыше 100 *км*), на которой обычно возникает северное сияние. Остается загадкой, почему красные звезды мерцают больше, чем белые *).

Мерцание оказывается самым сильным в северной части неба; это можно объяснить, хотя и несколько более сложным образом.

## 51. Мерцание планет

Планеты мерцают гораздо меньше, чем звезды. Нам это кажется несколько странным, поскольку невооруженный глаз не отличает планеты от звезд. Причина этого различия кроется в том, что диски звезд даже в самые большие телескопы кажутся простыми точками (самое большее 0″,05), так как они удалены от нас на громадные расстояния, в то же время планеты имеют видимые диаметры от 10 до 68″ (Венера) или от 31 до 51″ (Юпитер). Таким образом, в случае с планетами через маленький участок на большой высоте в атмосфере пройдет пучок световых лучей, из которых лишь немногие попадут в наш глаз. Поскольку струи воздуха, как мы знаем, отклоняют луч света всего лишь на несколько секунд дуги, то лучи, сперва попавшие в наш глаз, будут заменены другими лучами из того же пучка; следовательно, яркость совершенно не изменится. Мы заметим изменение в яркости только в том случае, если пучок лучей, первоначально проходивший мимо глаза, теперь попадает в глаз. Однако это изменение будет очень слабым благодаря тому, что лучи проходят много воздушных потоков, одни из которых изгибают лучи по направлению к нашему глазу, другие — в противоположном направлении. Когда Юпитер, например, находится на высоте 30° над горизонтом, конус световых лучей, попадающих в наш глаз от планеты, на высоте 2000 *м* будет иметь диаметр от 60 до 100 *см*. Понятно, что мерцание планеты станет заметным, когда изменение в направ-

*) Arch. sc. phys. nat. **29**, 545, 1893.

лении ее лучей будет того же порядка величины, что и видимый диаметр планеты. Вот почему Венера и Меркурий, которые иногда имеют форму узкого серпа, время от времени заметно мерцают, и вот почему Венера, находящаяся близко от горизонта, изменяется в цвете. Когда атмосфера очень неспокойна и планеты стоят низко на небе, наблюдатель непременно обратит внимание на изменения в интенсивности их света.

Таким образом, мерцание дает нам способ оценки величины световых пятнышек, которые при наблюдении их невооруженным глазом не обнаруживают никаких признаков протяженности. Некоторые считают, что с помощью этого метода можно определить диаметры звезд, но в настоящее время это утверждение звучит слишком оптимистично.

## 52. Бегущие тени *)

Мы узнали, что мерцание звезд вызывается неправильными флуктуациями плотности воздушного океана, на дне которого живем мы, обитатели Земли. Собственно говоря, это — такое же явление, как местное собирание и рассеивание солнечных лучей в слегка колеблющейся воде (§ 28); с точки зрения рыб, Солнце мерцает так же, как — с нашей точки зрения — мерцают звезды (см. рис. 36), с той только разницей, что флуктуации толщины водяных слоев замещаются флуктуациями плотности воздушных слоев. Последние по сравнению с первыми гораздо менее существенны, так что мы можем заметить мерцание лишь самых ярких точечных источников света.

Точно так же, как мы видели световые сгущения в прозрачной воде, мы можем хорошо рассмотреть потоки в воздухе.

Ночью в очень темной комнате с маленьким окном, открытым так, что оно пропускает лишь свет Венеры, можно увидеть быстрые клочья облаков, скользящие по стене или белому картонному экрану. Это — «бегущие тени». Их удается хорошо рассмотреть лишь тогда, когда планета находится близко к горизонту. Всякий раз, когда светило станет хотя бы немного ярче, через экран проходят яркая полоса, и наоборот, при уменьшении яркости на экране появляется темная полоса (ср. рис. 69). Впечатления, которые мы получаем от субъективных ощущений, подтверждаются и объективными данными. Потоки воздуха, о которых мы говорили, не имеют какого-либо определенного направления и движутся так же, как и ветер, преобладающий в том слое воздуха, где они возникают.

Кроме Венеры, для подобных наблюдений вполне подходят Юпитер, Марс, Сириус, Бетельгейзе, Процион, Капелла, Вега и Арктур, хотя эти наблюдения окажутся более трудными, поскольку свет этих

*) Cl. Rozet, C. R. Paris **142**, 913, 1906; **146**, 325, 1908.

светил слабее. Воздушные потоки можно хорошо рассмотреть, если на стену около вас падает свет от далекого прожектора, расположенного на расстоянии до 25 *км* *).

Очень своеобразные бегущие тени видны на белой стене или на простыне непосредственно перед или немедленно вслед за полной фазой солнечного затмения; очертания теней тогда напоминают складки гигантского занавеса **). Это тоже воздушные потоки, видимые в свете последнего серпа Солнца перед самым его исчезновением. В этот момент явление дает более сложный рисунок, чем от точечного источника света, так как каждая точка вытягивается в небольшую дугу (§ 1, 3), облакообразные потоки кажутся состоящими из полос, параллельных солнечному серпу (в самой яркой его части). Полосы колышутся от ветра, но мы видим лишь составляющую этого движения, перпендикулярную к их направлению. Такое явление иногда длится всего несколько секунд, часто — минуту и даже дольше. По расстояниям между полосами мы можем получить представление о средней толщине воздушных струй; обычно она составляет от 10 до 40 *см*.

Чтобы наблюдать теневые полосы от солнечного затмения, необходимо ждать полного затмения, которое происходит чрезвычайно редко. Однако наблюдения подобного рода можно вести и при восходе (или заходе) Солнца, в течение того короткого периода, когда над горизонтом виден лишь узкий сегмент солнечного диска. В этом случае полосы горизонтальны и передвигаются вверх и вниз со скоростью от 1 до 8 *м/сек*, в зависимости от силы ветра; расстояние между ними равно 3—20 *см*. Обычно они видны не дольше трех или четырех секунд, так как поднимающийся из-за горизонта сегмент солнечного диска очень быстро становится слишком широким.

---

*) Nature **37**, 224, 1888.
**) S. A. Mitchell, Handbuch d. Astrophys., IV, 353, 1929.

## 53. Звезды как источники света известной силы

Звезды образуют естественную последовательность источников света различной силы.

При помощи фотометров блеск звезд был измерен с большой точностью и составлена шкала так называемых *звездных величин*. Эти величины не имеют никакого отношения к размерам звезд и характеризуют только их блеск или силу света (светимость).

| $m$ — звездная величина | $i$ — светимость, измеренная в произвольных единицах | $m$ | $i$ |
|---|---|---|---|
| —1 | 251 | | |
| 0 | 100 | 0 | 100 |
| 1 | 39,8 | 0,1 | 91 |
| 2 | 15.8 | 0,2 | 83 |
| 3 | 6,31 | 0,3 | 76 |
| 4 | 2,51 | 0,4 | 69 |
| 5 | 1,00 | 0,5 | 63 |
| 6 | 0,40 | 0,6 | 58 |
| 7 | 0,16 | 0,7 | 53 |
| | | 0,8 | 48 |
| | | 0,9 | 44 |

Светимость каждой последующей группы в 2,51 раза слабее светимости предыдущей. Отвлекаясь от постоянного коэффициента, мы имеем: $i = 10^{-0{,}4m}$. Ниже приводятся звездные величины ярких звезд северного неба *):

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Сириус | —α Большого Пса | —1,3 | Альтаир | —α Орла | 1,1 |
| Вега | —α Лиры | 0,3 | Альдебаран | —α Тельца | 1,1 |
| Капелла | —α Возничего | 0,3 | Поллукс | —β Близнецов | 1,3 |
| Арктур | —α Волопаса | 0,2 | Регул | —α Льва | 1,6 |
| Процион | —α Малого Пса | 0,6 | Кастор | —α Близнецов | 1,7 |

*) О блеске других звезд можно найти справку в следующих изданиях: Астрономический Ежегодник СССР, выпускаемый Институтом теоретической астрономии АН СССР; Астрономический Календарь, подготавливаемый Всесоюзным Астрономо-геодезическим о-вом и выпускаемый изд-вом «Наука»; А. А. Михайлов, Атлас звездного неба, Гостехиздат, 1957; П. Г. Куликовский, Справочник любителя астрономии, 3-е изд., Физматгиз, 1961.

На рис. 71 показаны величины некоторых звезд, расположенных в окрестностях ссзвездия Большой Медведицы и видимых в течение всего года. Звездные величины одного из ярких зимних созвездий — Ориона — даны на рис. 72.

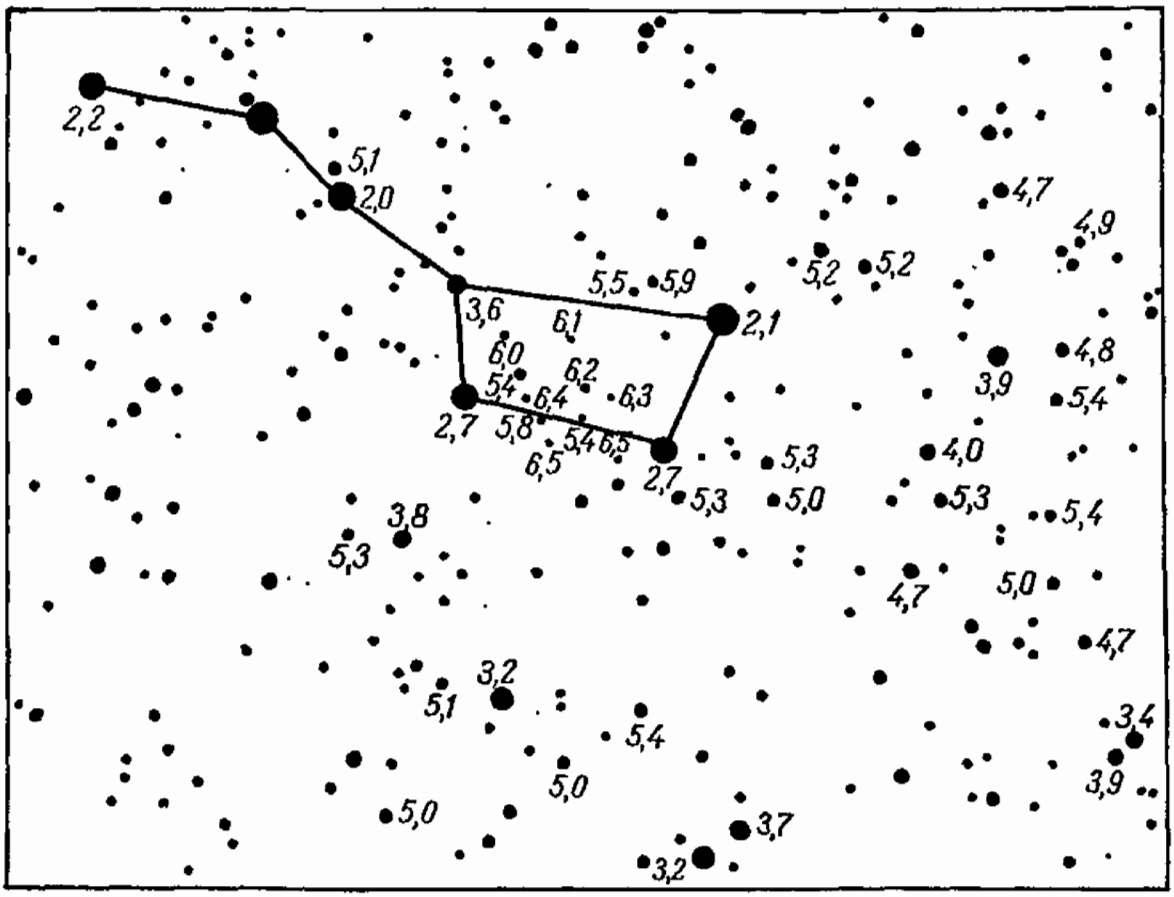



Рис. 71. Область созвездия Большой Медведицы. Числа указывают блеск звезд в звездных величинах.

Как правило, в темные ночи и вдали от городских огней мы видим звезды до 6-й величины.

## 54. Ослабление света в атмосфере

Близ горизонта, вследствие поглощения лучей света в воздухе, мы наблюдаем обычно очень немного звезд. Лучи, направленные практически горизонтально, проходят в атмосфере гораздо более длинный путь, нежели падающие круто, и претерпевают поэтому большее уменьшение интенсивности.

Попытаемся определить это уменьшение с помощью звездной карты, на которой обозначены звездные величины; в действительности, впрочем, когда Орион стоит низко, а Большая Медведица — высоко, достаточно будет рисунков § 53. Указанные в них звездные величины относятся к положению звезд высоко в небе. Возьмем какую-либо звезду $A$, расположенную недалеко от горизонта, и сравним ее блеск с блеском звезд около зенита (выше 45° блеск практически не ослабляется). По мере возможности, отыщем звезды

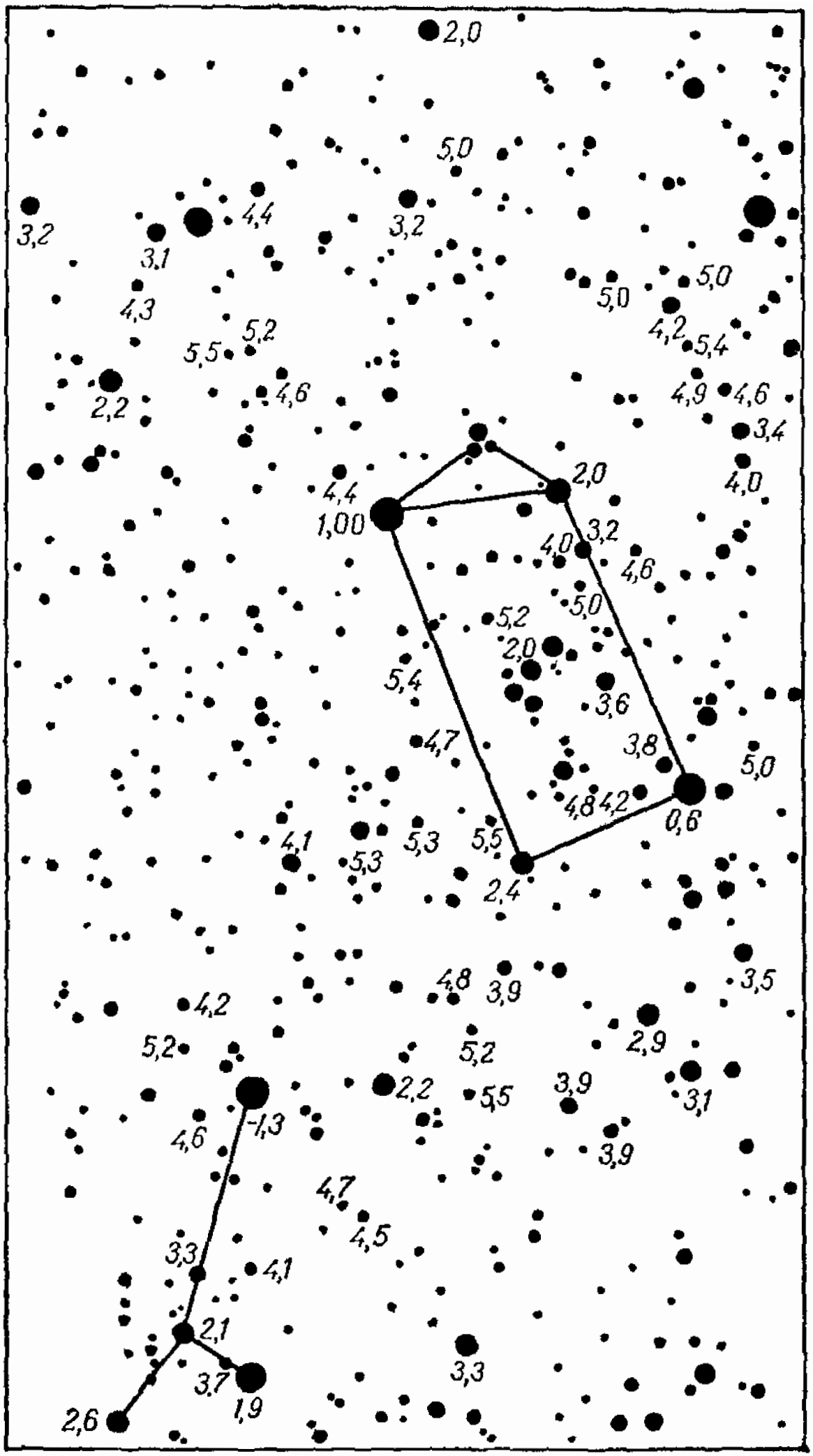



Рис. 72. Область созвездия Ориона. Числа указывают блеск звезд.

приблизительно такой же яркости, как $A$, и определим разницу между наблюдаемой величиной звезды $A$ и истинной величиной, приведенной в таблицах, обозначив эту разницу через $\Delta$ Одновременно установим высоту звезды (§ 265)

Если мы проведем эти измерения для ряда звезд, находящихся на различных высотах $h$ над горизонтом (чтобы получить первое представление, достаточно десяти звезд), то наша таблица будет более или менее похожа на такую

| $h$ | $\Delta$ | $z$ | sec $z$ |
|---|---|---|---|
| 90° | 0 | 0° | 1 |
| 45 | 0 09 | 45 | 1,41 |
| 30 | 0,23 | 60 | 2 00 |
| 20 | 0,45 | 70 | 2,92 |
| 10 | 0,98 | 80 | 5,73 |
| 5 | 1,67 | 85 | 11 4 |
| 2 | 3,10 | 88 | — |

Цифры во второй колонке, показывающие вызванное атмосферой ослабление света,— это средние значения для нашей области земного шара при очень чистом небе, эти цифры меняются, однако, в зависимости от места наблюдения и еще больше из ночи в ночь. В таблицу включены также расстояние от зенита $z = 90° - h$ и sec $z$ — величина, пропорциональная длине пути, пройденного светом в атмосфере (рис 73)

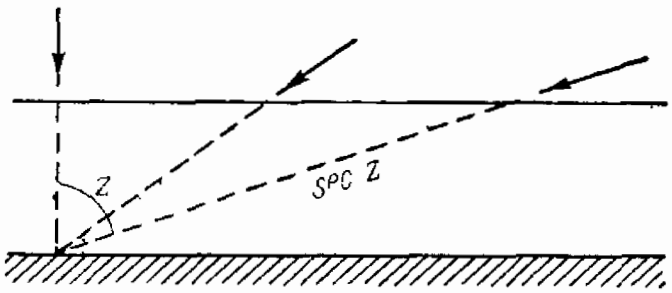



Рис 73 Чем больше наклон светового луча, тем длиннее его путь в атмосфере

Сопоставьте теперь значения $\Delta$ и sec $z$, и вы найдете, что точки располагаются более или менее близко к некоторой прямой (рис. 74) По этому графику мы можем определить, на сколько звездных величин уменьшается блеск звезды по мере удлинения пути, пройденного светом в атмосфере График особенно интересен тем, что, продолжая линию, мы сможем установить, насколько ярче казались бы нам звезды, если бы мы могли подняться над окружающей Землю атмосферой, т е выше стратосферы Блеск звезд около зенита возрос бы на целых 0,2 звездной величины, т е в произвольных единицах — с 83 до 100

Итак, около $^1/_6$ света лучей, падающих почти перпендикулярно, теряется, и это заключение справедливо для Солнца так же, как и

для звезд. Такое ослабление происходит не из-за поглощения света, а вследствие его рассеяния, которому обязано небо своим голубым цветом (ср § 189)

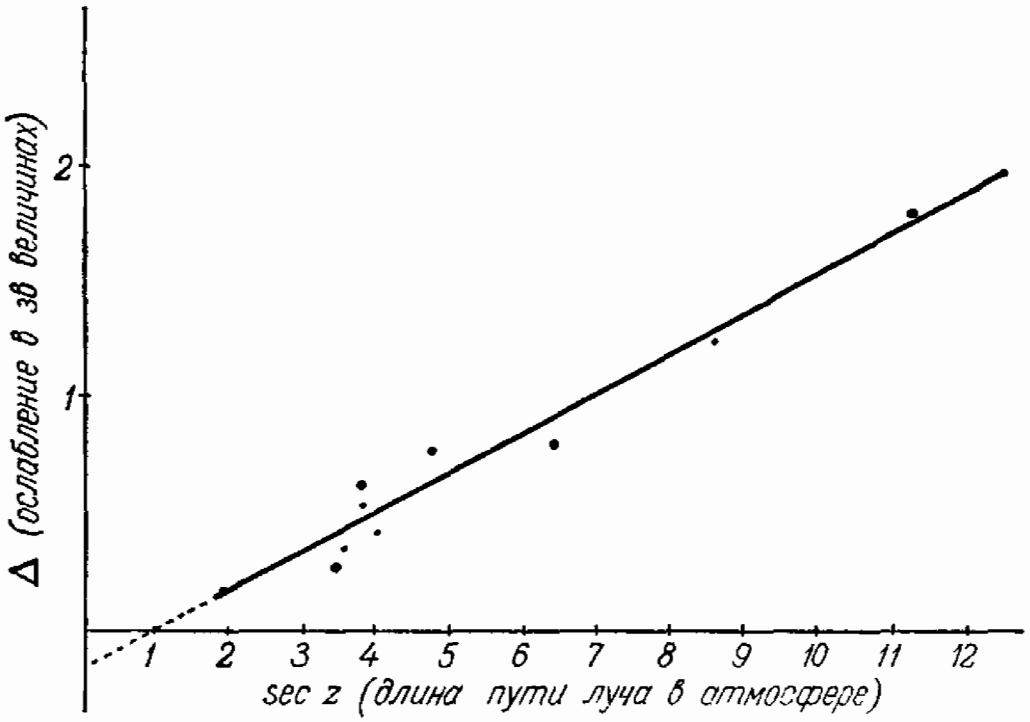



Рис 74 Ослабление света звезды Δ в звездных величинах на разных расстояниях от зенита

Измерения, описанные выше, дают лучшие результаты при наблюдении ярких светил (например, Сириуса или Венеры), находящихся около горизонта ($z > 80°$)

## 55. Сравнение звезды со свечой

Выйдем ночью на открытое место и сравним свет свечи со светом яркой звезды, например Капеллы Удивительно, на какое большое расстояние надо отойти от свечи, чтобы ее свет сравнялся со светом звезды. почти на 900 *м*! Таким образом, на Земле освещенность от Капеллы равна $\frac{1}{900^2} = \frac{1}{810\,000}$ люкса

Для этого опыта можно использовать также карманный фонарик, но тогда потребуются еще бóльшие расстояния Закрепите фонарик на крыше дома или снаружи за окном высокой башни Отметьте различие в цвете света фонарика и звезды

## 56. Сравнение двух уличных фонарей

Каждый раз, когда во время вечерней прогулки нам случится пройти между двумя фонарями, мы замечаем то здесь, то там две своих тени, и чем ближе мы подходим к одному из фонарей, тем темнее становится одна из теней Очевидно, когда обе тени одинаково

темны, освещенность от обоих фонарей одинакова. Если принять расстояния до фонарей соответственно за $a$ и $b$, то отношение создаваемых ими освещенностей будет $\frac{A}{B} = \frac{a^2}{b^2}$.

Поразительно различие в цвете теней, отбрасываемых газовым фонарем и электрической лампой. Сравнение будет нагляднее, если лучи от обоих источников падают на экран, на котором мы наблюдаем за тенями, под одним и тем же углом.

Интересно понаблюдать за тенями карандаша или пальца, падающими на лист бумаги.

## 57. Сравнение Луны с уличным фонарем

Найдите две тени, отбрасываемые этими двумя источниками света. Тень от Луны имеет красноватый оттенок, тень от фонаря — темно-синий (ср. § 111). Мы удаляемся от фонаря, и лунная тень остается такой же темной, в то время как тень от фонаря бледнеет. Допустим, что обе тени одинаковы на расстоянии 20 метров от фонаря. Я оцениваю силу света обычной электрической лампочки в 50 свечей; на расстоянии 20 *м* от нее освещенность равна $\frac{50}{20^2} = 0{,}13$ люкса.

Следовательно, такой же должна быть и освещенность от полной Луны во время нашего опыта.

Повторим теперь этот опыт во время первой или третьей четверти. Освещенность уменьшится много больше чем наполовину, потому что значительная часть лунной поверхности затемнена косыми тенями лунных гор (ср. § 191). Точные значения освещенности от Луны таковы: для полной Луны — 0,20 люкса, для первой или третьей четверти — 0,02 люкса.

## 58. Яркость лунного диска

Когда Дж. Гершель отправился в Южную Африку и корабль прибыл в Кейптаун, ученый увидел, как почти полная Луна поднималась над Столовой горой, освещенной лучами заходящего Солнца. Гершеля поразило, что скалы казались ярче Луны, и это привело его к заключению, что лунная поверхность должна быть сложена из темных пород.

Такое же наблюдение можете провести и вы, если сравните полную Луну, поднимающуюся около 6 часов вечера, с белой стеной, освещенной заходящим Солнцем. Расстояния между Солнцем и Луной и между Солнцем и Землей практически равны. Если бы Луна и стена были сделаны из одного и того же материала, их яркость оказалась бы одинаковой, несмотря на то, что их расстояния от наблюдателя сильно различаются (великолепный пример применения

классической теоремы фотометрии!). Наблюдаемое различие в яркости можно приписать тому, что Луна состоит из темных пород.

Чтобы наблюдения были абсолютно точными, Солнце и Луна должны находиться на равной высоте над горизонтом; тогда ослабление света при прохождении через атмосферу будет у них одинаковым.

## 59. Некоторые соотношения яркости в пейзаже *)

Яркость Солнца = 300 000 × яркость голубого неба.

Яркость белого облака = 10 × яркость голубого неба.

В обычный солнечный день, при ясном небе, 80% света исходит непосредственно от Солнца, 20% — от неба **).

Освещенности горизонтальной плоскости безоблачным небом после захода Солнца таковы:

| Высота Солнца: | 0° | −1° | −2° | −3° | −4° | −5° | −6° | −8° | −11° | −17° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Освещенность (*лк*): | 400 | 250 | 113 | 40 | 13 | 4 | 1 | 0,1 | 0,01 | 0,001 |

Глаз приспосабливается к любой освещенности так быстро и хорошо, что мы никогда не ощущаем полностью, как велики различия в яркости вокруг нас. Сравним пейзаж, освещенный высоко стоящим Солнцем, с пейзажем, освещенным Луной ***):

| | | | |
|---|---|---|---|
| Диск солнца | $400 \cdot 10^9$ | Диск Луны | 90 000 |
| Совершенно белый объект | $7 \cdot 10^6$ | Совершенно белый объект | 15 |
| Совершенно черный объект | $0{,}14 \cdot 10^6$ | Совершенно черный объект | 0,3 |

Отсюда видно, что в одном и том же пейзаже отношение яркости не превышает 50 : 1, однако в абсолютных величинах освещенность меняется очень сильно. Совершенно черный объект при солнечном свете в 10 000 раз ярче белой бумаги при Луне.

При солнечном свете все освещение в целом в 500 000 раз больше, чем освещение при Луне.

Предметы в тени освещены в 10 раз слабее, чем предметы, не защищенные от Солнца. Самыми темными местами днем являются сводчатые входы в здания, промежутки между листьями деревьев и т. д., которые иногда создают сильные контрасты в пейзаже. Их освещенность не превосходит 1 люкса.

Можно представить себе различие в яркости между отдельными объектами ландшафта, сравнивая их коэффициенты отражения:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Свежий снег | 80—85% | Мокрая земля | 8—9% |
| Старый снег | 40% | Реки и лужи | 7% |
| Трава | 10—33% | Глубокие океаны | 3% |
| Сухая земля | 14% | Пруды и канавы | 2%. |

*) Postma, Daylight Measurements in Utrecht (Diss., 1936).

**) Reesinck, Physica **11**, 61, 1944; Siedentopfen Holl, Reichsber. Phys. **1**, 32, 1944.

***) K. Kähler, Meteor. Zs. **44**, 212, 1927.

Если наблюдать с самолета, то можно заметить, как меняется яркость различных частей ландшафта из-за рассеяния света в воздухе, сквозь который мы смотрим вниз. До 80% света отражают облака.

## 60. Отражательная способность

Приходилось ли вам видеть отражение звезды в воде? В городе это едва ли возможно, в деревне темной безветренной ночью такое отражение в пруду или в озере весьма примечательно.

Яркие звезды 1-й величины, близкие к зениту, дают слабое отражение, равное примерно звездам 5-й величины. Разница в четыре величины означает, что отношение интенсивностей равно приблизительно 40, и, следовательно, вода отражает всего 2,5% света вертикально направленных лучей. Звезды, располагающиеся ближе к горизонту, отражаются лучше.

Отражающая способность связана с показателем преломления формулой Френеля и для перпендикулярного падения равна:

$$\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2.$$

В приведенной ниже таблице даны значения отражающих способностей воды и стекла при различных углах падения:

| Угол падения | Отражающая способность | |
|---|---|---|
| | воды | стекла ($n=1{,}52$) |
| 0° | 0,020 | 0,043 |
| 10 | 0,020 | 0,043 |
| 20 | 0,021 | 0,044 |
| 30 | 0,022 | 0,045 |
| 40 | 0,024 | 0,049 |
| 50 | 0,034 | 0,061 |
| 60 | 0,060 | 0,091 |
| 70 | 0,135 | 0,175 |
| 75 | 0,220 | 0,257 |
| 80 | 0,350 | 0,388 |
| 85 | 0,580 | 0,615 |
| 90 | 1,000 | 1,000 |

Теперь понятно, что в городе мы никогда не сможем увидеть отражение звезды: там недостаточно темное небо, так что едва заметны звезды 3-й величины, а кроме того, чересчур освещена вода. Видны только отражения планет, и лишь тогда, когда планеты много ярче 1-й величины.

Распространен предрассудок, будто звезды никогда не отражаются в глубоких водах. Он, однако, не имеет под собой каких-либо оснований. Объясняется он частично тем, что мы почти всегда наблюдаем за поверхностью воды под очень маленьким углом по отношению

к горизонту, частично же его можно приписать психологическому фактору.

Понаблюдайте за отражением от спокойной поверхности воды и держите горизонтально перед собой карманное зеркало и кусочек темного стекла, сравнивая их яркость с яркостью воды при различных углах падения.

Днем также можно наблюдать за тем, в какой мере зависит отражающая способность воды от угла падения. Любая лужа на обочинах дороги будет выглядеть для наблюдателя по-разному, если он будет смотреть на нее перпендикулярно или наклонно. Если на самолете лететь над морем, то можно заметить, какой темной кажется вода внизу и какой светлой она становится на горизонте.

Днем яркость отраженного в воде голубого неба, отражений домов и деревьев представляется значительно превышающей 2%, на некоторых пейзажах едва можно заметить различие в яркости объектов и отражений. Но это — просто-напросто оптический обман.

Оконное стекло отражает каждой своей поверхностью 0,043 падающего света, т. е. всего — 0,086. Во многих небольших стеклянных постройках, таких как телефонные будки и т. д., освещенных подвешенной электрической лампочкой, можно видеть отражения, повторенные двумя параллельными и противоположными стеклами; обычная матовая лампочка дает сразу четыре видимых отражения в каждой из стенок. Первое создано однажды отраженным светом, второе — трижды, третье — пять раз и четвертое — семь раз отраженными лучами. Яркость последнего отражения составляет, таким образом, всего $(0{,}086)^7$, т. е. меньше одной десятимиллионной части первоначальной яркости! Этот простой подсчет служит хорошим примером того, как грандиозен диапазон яркостей, на которые способен реагировать наш глаз.

## 61. Прозрачность проволочной сетки

Светящиеся рекламные надписи на крышах нередко установлены на проволочной сетке, прикрепленной к металлическому каркасу.

На расстоянии отдельные проволочки уже не различимы и сетка напоминает лист однородного серого стекла. Интересно рассматривать эту сетку под все меньшим углом к ней и наблюдать, как она становится все темнее и темнее на фоне неба. Это доказывает, что проволока, из которой сплетена сетка, имеет круглое поперечное сечение, так как если бы сетка была сделана из небольших плоских полос, она оставалась бы одинаково темной, под каким бы углом мы ни смотрели на нее (рис. 75).

## 62. Степень непрозрачности леса

Глядя сквозь узкую лесную полосу, мы видим между стволами светлое небо. Очевидно, должна существовать какая-то формула, показывающая, какая часть света проходит к нам беспрепятственно.

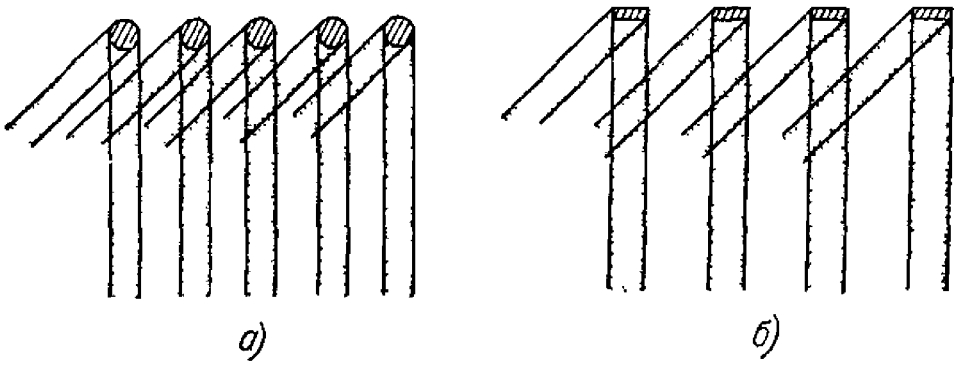



Рис. 75. Свет, перехваченный проволочной сеткой, видимой с двух направлений *а*) если проволока имеет круглое поперечное сечение; *б*) если сетка состоит из плоских полос.

Для этого допустим, что распределение деревьев случайно, на квадратном метре растет $N$ деревьев, и на уровне глаза диаметр стволов равен $D$.

Рассмотрим пучок света шириной $b$, который уже прошел в лесу расстояние $l$ (рис. 76). Пусть $i$ — количество света, которое осталось от первоначального количества $i_0$. Когда световые лучи проникнут еще немного дальше на малое расстояние $dl$, количество света $di$ изменится в соответствии с формулой

$$\frac{di}{i} = -\frac{NDbdl}{b} = -dlND,$$

откуда после интегрирования получится

$$i = i_0 \cdot e^{-NDl} = i_0 \cdot 10^{-0,43NDl}.$$

Количество пропускаемого света будет, таким образом, все больше и больше уменьшаться в зависимости от того, как далеко простирается лес в том направлении, в котором падает свет; точно так же с увеличением толщины слоя убывает свет, проходящий сквозь темную жидкость.

Предположим, что в еловом лесу $N=1$ на *кв. м* и $D=0{,}10$ *м*. Тогда приблизительно:

| $l$ | $\frac{i}{i_0}$ |
|---|---|
| 10 *м* | 0,37 |
| 25 *м* | 0,10 |
| 50 *м* | 0,01 |
| 70 *м* | 0,001 |

Поразительна быстрота, с которой возрастает непрозрачность. Грубо оценив долю горизонта, еще не закрытую деревьями, мы можем определить глубину леса.

Как велико $ND$ в буковом лесу, в молодом ельнике и еловом бору?

К этому вопросу можно добавить интересные замечания, основанные на теории вероятностей *).

Например, число просветов пропорционально $l^2e^{-NDl}$, когда $l$ представляет собой расстояние до границы леса. По мере того, как мы приближаемся к окраине леса, мы видим, как возрастает постепенно количество просветов, а потом их число начинает быстро уменьшаться. Их число достигает максимума при $l = \frac{2}{Nd}$.

В глубине рощи число стволов, из-за которых можно еще что-то видеть, равняется $\frac{4\pi}{Nd^2}$, или 1257 в нашем примере.

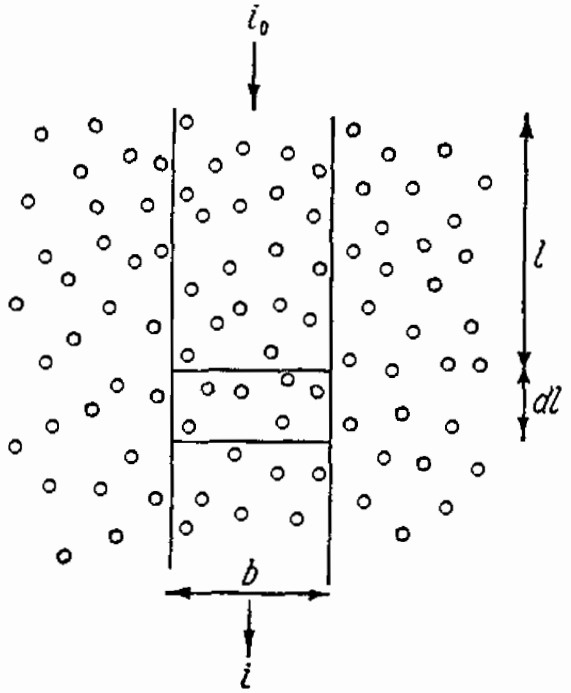



Рис. 76. Как вычислить, сколько света можно увидеть в лесу между стволами деревьев.

## 63. Просветы в двойном частоколе (фотография X) **)

Если в двойном частоколе столбы одного ряда просматриваются между столбами другого, то можно видеть широкие светлые и темные полосы, которые перемещаются при движении наблюдателя. Эти полосы обусловлены тем, что видимое расстояние между столбами двух рядов частокола более или менее неодинаково, или потому, что в одном ряду столбы располагаются дальше друг от друга, или потому, что различны расстояния их от нашего глаза. В одних направлениях столбы кажутся совпадающими и, так сказать, идут «в ногу», в других — столбы первого ряда точно укладываются в промежутки между столбами второго, вследствие чего возникает различие в средней яркости.

Обратив однажды внимание на эти «биения», вы затем будете замечать их повсюду. Каждый мост, имеющий по обеим сторонам парапет в виде частокола, показывает такие полосы, если смотреть на него с известного расстояния. Они возникают также, если тень от столбов видна между самими столбами; в этом случае промежутки между столбами и между тенями одинаковы, но различны расстояния до нашего глаза.

На некоторых вокзалах грузовой лифт огражден проволочной сеткой, и ближайшая к нам сторона в сочетании с самой удален-

---

*) H. Bock, Zs phys. chem. Unterricht **53**, 139, 1940.

**) Niederhoff, Zs. f. Sinnesphysiol. **65**, 27, 232, 1934; **66**, 213, 1936.

ной образует нечто вроде муара, подобного тому, какой можно видеть, если наложить один на другой два куска тонкой проволочной сетки или два гребня с неодинаково частыми зубьями.

Рассмотрим подробнее простой случай (рис. 77): два одинаковых «частокола», отстоящих от нашего глаза на расстоянии $x_1 = OA$ и $x_2 = OB$. Обозначим буквой $l$ расстояние между двумя соседними столбами; мы видим его под углом $\gamma_1 = \frac{l}{x_1}$ в первом случае и $\gamma_2 = \frac{l}{x_2}$ — во втором. В «волне» биения будет насчитываться $n$ столбов, где $n$ равно $\frac{\gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2} = \frac{x_2}{x_2 - x_1}$; иными словами, длина «волны» возрастает по мере нашего удаления от частокола. Напротив, угол $\theta$, стягиваемый «волной», останется тем же, поскольку $\theta = n\gamma_2 = \frac{l}{x_2 - x_1}$.

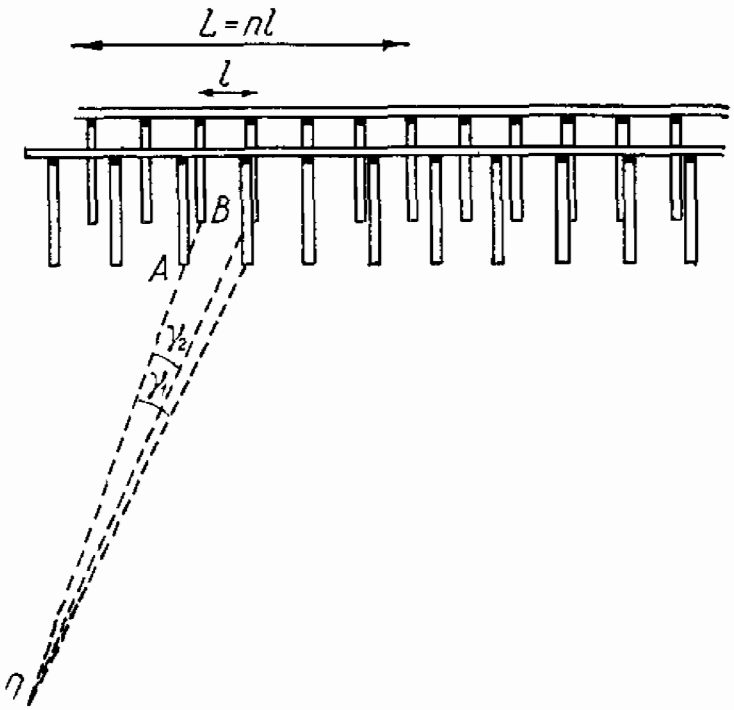



Рис. 77. Просветы в двойном частоколе.

Двигаясь параллельно частоколу, мы можем определить истинную длину «волны» $L = nl = \frac{lx_2}{x_2 - x_1}$, поскольку «волны» будут передвигаться с той же скоростью, что и мы.

Измерив теперь расстояние, которое нужно пройти, чтобы «волна» заняла место своей предшественницы, проверьте правильность формул. Или, наоборот, определив $n$, $\theta$ и $L$, найдите $x_2$, $x_2 - x_1$ и $l$.

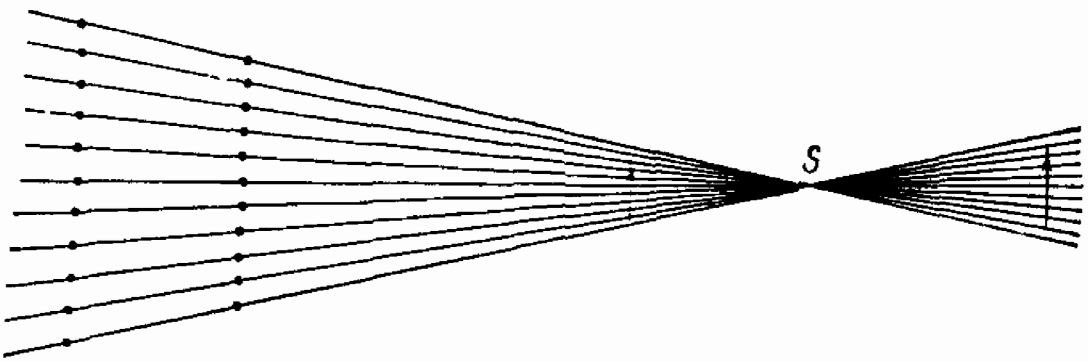



Рис. 78. Просветы в частоколе между двумя рядами с различными периодами.

Таким путем без применения каких-либо иных средств можно установить на расстоянии все размеры частокола.

Если периоды двух рядов неодинаковы, просветы по мере движения глаза будут перемещаться то в направлении движения, то в про-

тивоположном, в зависимости от того, находимся ли мы впереди или позади точки $S$ (рис. 78); иначе говоря, в зависимости от того, будет ли $\gamma_1 < \gamma_2$ или $\gamma_1 > \gamma_2$, просветы будут передвигаться все быстрее, по мере нашего приближения к $S$.

Когда вертикальная изгородь отбрасывает тень на Землю, просветы выглядят несколько иначе (рис. 79): вершины полос сближаются, заметно также их некоторое искривление. Однако все это вполне согласуется с приведенными соображениями: расстояние между

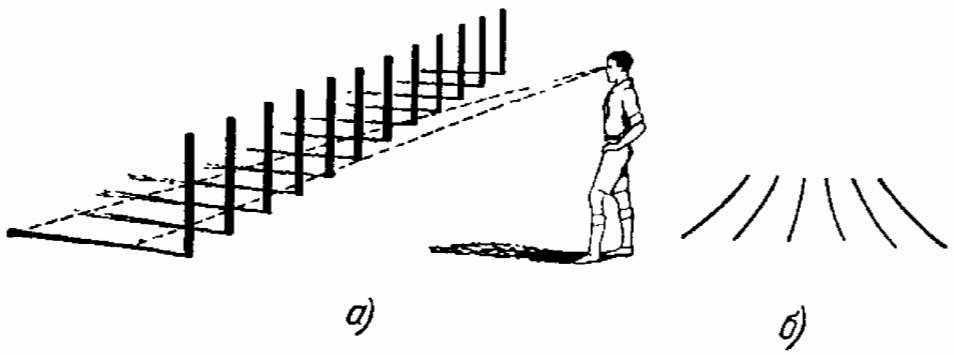



Рис. 79. Просветы между столбами ограды и их тенью:
*а*) условия наблюдения; *б*) наблюдаемая картина.

этими двумя «складывающимися» решетками больше всего у вершины, поэтому угловые расстояния между последовательными полосами здесь сильно различаются, а это и значит, что просветы ложатся близко друг к другу; иная картина — у основания изгороди.

## 64. Фотографическая фотометрия *)

Фотографическая «дневная бумага» на солнечном свету очень быстро становится пурпурно-коричневой. Измерения показывают, что время, нужное для того, чтобы бумага приобрела определенный цвет, в общем обратно пропорционально интенсивности света, падающего на бумагу (закон Бунзена — Роско). Поэтому, если применять всегда один и тот же сорт бумаги и выбрать кусок обычной пурпурно-коричневой бумаги в качестве эталона «нормального тона», нетрудно определить интенсивность света в любом месте, просто отметив время, необходимое для того, чтобы светочувствительная бумага приобрела нормальный тон. Бумагу, которая уже приобрела нормальный тон, нужно держать на свету как можно меньше, иначе она поблекнет.

Нормальный тон следует выбирать с большой осмотрительностью. Выставим на Солнце лист дневной бумаги и будем последовательно

*) J. Wiesner, Der Lichtgenuss der Pflanzen, Leipzig, 1907; Denkschr. Akad. Wien **64**, 1896; **67**, 1898; Sitzungsber. Akad. Wien, 1900 и 1905.

закрывать полосы, подвергшиеся облучению в продолжение 10, 20, 40, 80, 160, 320 и 640 секунд. Рассматривая затем этот лист при слабом свете, мы обнаруживаем, что первые и последние полосы мало различаются между собой; напротив, лучше всего вышли средние полосы. Выберем за эталон кусок бумаги (книжную обложку или плакат) того же цвета и по возможности того же оттенка, как и одна из средних полос. Не беда, если оттенок не совсем совпадает: при сопоставлении вам придется уделять наибольшее внимание яркости, оценивать которую нужно прищурившись. Нет надобности проявлять или фиксировать нашу дневную бумагу; использованные полосы можно выбросить.

По такому методу Виснер осуществил ряд опытов с целью изучения «светового климата», необходимого для развития различных растений. Способ может показаться слишком простым и грубым, однако он прекрасно позволяет оценивать в разных местностях и при самых разных обстоятельствах величину, о которой иначе мы не получим ни малейшего представления.

Определите освещенность горизонтальной плоскости при различной высоте Солнца.

Сравните свет в солнечный день: а) когда экран отбрасывает тень на эту плоскость и б) без экрана, и сравните таким путем свет, исходящий непосредственно от Солнца, и свет от голубого неба.

Сопоставьте освещенность верхней и нижней сторон горизонтального листка бумаги. Отношение освещенностей будет равно: над водой — 6, над гравием — 12, над травой — 25.

Сравните светимость голубого неба в различных направлениях, помещая фотобумагу на дне одинаковых по размеру трубок, расположенных под разными углами к горизонту. Обычно небо бывает самым темным в 90° от Солнца (ср. § 195).

Сравните освещенность в глубине леса и вне его («вне» означает — по крайней мере в 20 *м* от его края).

Сравните освещенность в буковом лесу: а) в середине апреля, б) когда распускаются первые листья, в) в начале июня. В одном случае было установлено, что освещенность равна соответственно $^1/_{11}$, $^1/_{30}$ и $^1/_{64}$ освещенности вне леса.

Измерьте освещенность в местах, где растут следующие растения:

| | |
|---|---|
| Большой подорожник (Plantago major) | . . . 1 |
| Плющ (Hedera helix) | . . . от 1 до 0,22 (в цвету)<br>. . . от 1 до 0,02 (с бесплодными ветками) |
| Вереск (Calluna vulgaris) | . . . от 1 до 0,10 |
| Папоротник орляк (Pteridum aquilinum) | . . . до 0,02 |

Определите освещенность внутри тесно растущих древесных крон; ее величина близка к наименьшей освещенности, при которой могут развиваться побеги. Для одиночных деревьев найдены следующие значения (выраженные в долях освещенности вне дерева): лиственница — 0,20; береза — 0,11; сосна обыкновенная — 0,10; ель — 0,03; бук — 0,01.

Эти числовые соотношения на языке специалиста называются *факторами дневного света*. Они могут быть также применимы к освещению в жилом помещении и частично используются при проектировании осветительных систем.

Изучение природы непременно должно включать в себя также изучение чувств человека Чтобы добиться точности в наших наблюдениях света и цвета, мы должны прежде всего ознакомиться с инструментом, которым нам постоянно приходится пользоваться, а именно — с человеческим глазом Весьма поучительно разобраться в том, что в действительности являет нам природа и что добавляет к этому или чем поступается наш орган зрения Особенности глаза всего лучше исследовать на открытом воздухе, в той среде, к которой природа нас приспособила.

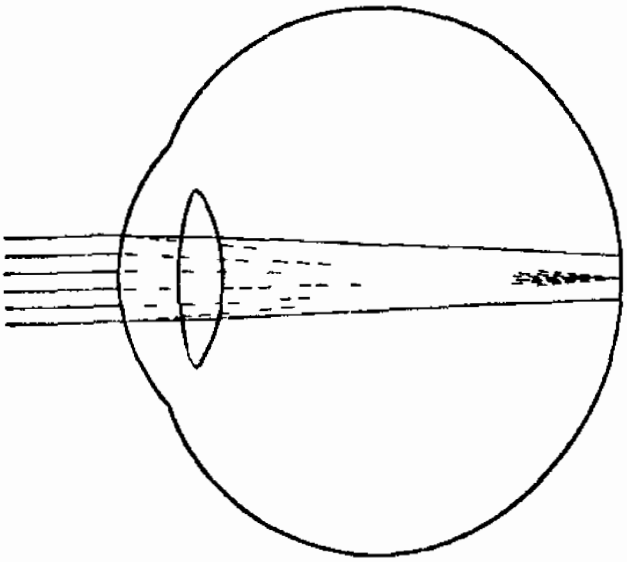


Рис 80 Если смотреть под водой, в глазу не создается четкого изображения Сплошными линиями обозначен путь световых лучей, воспринимаемых под водой, пунктиром — световые лучи, видимые на воздухе

## 65. Ви́дение под водой **)

Не пытались ли вы когда-нибудь открывать глаза под водой? Чуть-чуть храбрости,— и это совсем нетрудно! Но каждый предмет, на который мы теперь смотрим, становится неясным, туманным даже в бассейне с очень чистой водой На воздухе именно внешняя, роговая оболочка глаза собирает световые лучи, создает изображения на сетчатке, а хрусталик лишь немного в том помогает. Однако под водой действие роговицы сводится к нулю вследствие того, что показатели преломления воды и жидкости, находящейся внутри нашего глаза, почти одинаковы, и лучи, не преломляясь, прямо проходят сквозь роговицу (рис 80). На основании такого опыта мы легко мо-

*) При чтении этой и следующих трех глав советуем обратиться к классической работе Гельмгольца «Физиологическая оптика» (второе или, желательнее, третье издание), см также W S t D u k e - E l d e r, Textbook of Ophthalmology, 1938, К р а в к о в С В , Глаз и его работа, изд 3-е, Медгиз, 1945

**) O A u f s e s s, Das Sehen unter Wasser, 1912, A B i e r m a n, Reflex 7, 39, 1936

жем судить о том, как плохо мы видели бы, если бы изображение создавалось одним хрусталиком Под водой мы так безнадежно дальнозорки, что правильная фокусировка глаза практически невозможна, и световая точка, на каком бы расстоянии она ни находилась, остается одинаково расплывчатой Чтобы различить предмет, существует единственная возможность: приблизить его к глазу настолько, чтобы рассматривать под большим углом, тогда неустранимая туманность очертаний уже не является серьезной помехой

В чистой воде мелкая монета оказывается различимой на расстоянии, равном длине руки (60 *см*), а кусок стальной проволоки вообще нельзя увидеть ни на каком расстоянии Напротив, каждого пловца можно обнаружить метров за девять, такой крупный объект будет замечен обязательно. Грубо говоря, предмет длиной $v$ обнаруживается на расстоянии, по крайней мере равном $30v$, приблизительную форму его можно установить на расстоянии $5v$, а говорить о том, что мы его видим как следует, можно только тогда, когда предмет находится на расстоянии, равном его собственным размерам

Чтобы видеть нормально, нужны очень сильные очки, но, к несчастью, действие очков под водой в четыре раза менее эффективно, чем на воздухе Хуже того, такие сильные стекла теряют часть эффективности, будучи расположены всего в нескольких миллиметрах от глаза! Принимая все это во внимание, мы должны взять линзу в 100 диоптрий, т е с фокусным расстоянием 1 *см*! Подошла бы, например, лупа, которой пользуются при контроле тканей.

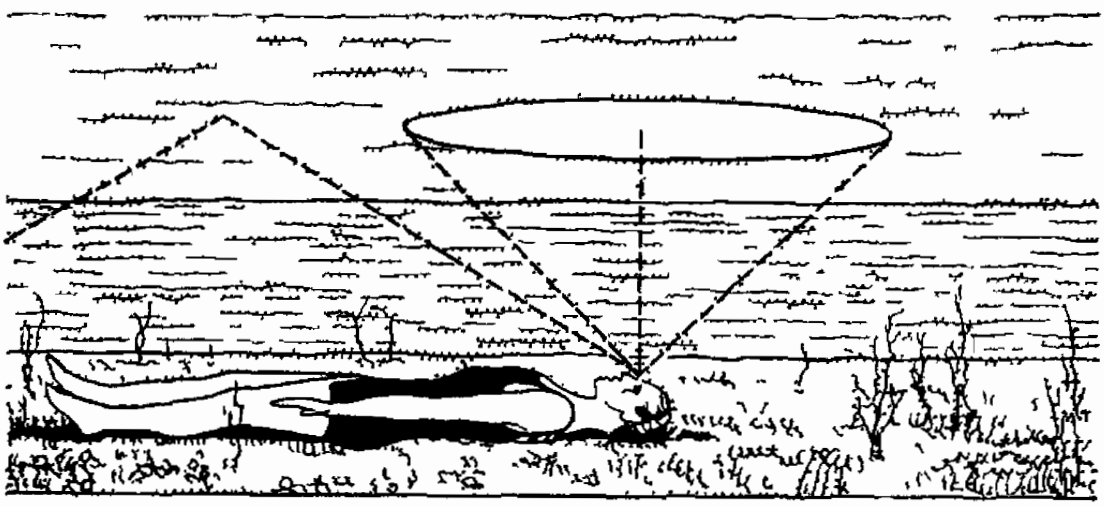


Рис 81 В этот момент мы видим так же, как рыбы.

Заметьте, как трудно оценить расстояние под водой как в очках, так и без очков. Предметы выглядят размытыми и почти призрачными

Попробуйте, лежа под водой, посмотреть вверх Световые лучи, проникая в воду, образуют с перпендикуляром угол, меньший 45°, так что мы увидим у себя над головой большой светлый круг. Если

же посмотреть в сторону, в глаз попадет луч, испытавший полное внутреннее отражение от поверхности воды, и мы увидим лишь отраженное изображение слабо освещенного дна (рис. 81). Таким и кажется мир рыбам!

Мы можем хорошо представить себе, как видно под водой, если, стоя в воде и стараясь не делать ряби, будем держать в воде зеркало, немного его наклонив. Заметьте, как сжимаются по вертикали предметы, находящиеся над водой,— тем сильнее, чем ближе они к горизонту. Каждый из них окружен великолепной цветной каймой.

## 66. Как сделать видимой внутренность глаза

Опытный наблюдатель может увидеть желтое пятно своего глаза (центральное, самое чувствительное место сетчатки), окруженное более темным кольцом, в котором нет кровеносных сосудов *). Вечером, после того, как вы находитесь уже некоторое время на воздухе, взгляните на безоблачное небо, когда появляются первые звезды. Закройте глаза на несколько секунд, а затем снова откройте их, по-прежнему глядя на небо. Мрак исчезнет сначала по краям поля зрения и быстро сгустится к центру, где внезапно станет видимым желтое пятно с темной каемкой; иногда оно даже на мгновение осветится.

Когда мы прогуливаемся вдоль высокой изгороди, сквозь которую пробиваются яркие солнечные лучи, то Солнце не раз сверкнет нам в глаза. Если смотреть прямо перед собой и не поворачивать глаз к Солнцу, можно с удивлением обнаружить, что каждому проблеску сопутствуют яркие неясные фигуры на темном фоне — неправильной формы пятна, сетка, боковые линии. Благодаря необычному освещению мы видим таким путем кровеносные сосуды сетчатки.

Заглянуть внутрь глаза можно и другим путем. Если смотреть на темное небо, вращая перед глазом маленький кружок бумаги, наколотый на булавку, вы отчетливо увидите желтое пятно и т. п.

## 67. Слепое пятно

Другое замечательное место нашей сетчатки — «слепое пятно», где зрительный нерв входит в глаз. Здесь нет клеток, чувствительных к свету. Это пятно располагается приблизительно в 15° от желтого пятна, ближе к носу. Таким образом, если мы фиксируем взгляд на какой-либо метке перед нами, другая отметка, отстоящая от первой на 15°, становится невидимой (для правого глаза эта отметка

*) H. Helmholtz, Physiologische Optik, 3-е изд., т. II, 255. Лично мне не удалось провести этот опыт.

располагается справа, для левого — слева). Это явление можно хорошо наблюдать на звездах *). Выберите момент, когда Вега и β Лебедя находятся приблизительно на одной высоте; закройте левый глаз и внимательно смотрите на β Лебедя: яркая звезда Вега исчезает! Может быть, придется несколько наклонить голову; если наклонять голову сильнее, звезда появляется вновь. Это явление можно также наблюдать осенью на звездах Большой Медведицы: если фиксировать правый глаз на весьма слабой звезде δ, яркая звезда η исчезает **).

В весенние вечера созвездие находится в перевернутом положении и можно провести опыт с левым глазом. Нетрудно найти и другие примеры.

Наиболее неожиданно, что обычно мы не замечаем «дыры» в нашем поле зрения: наши глаза непрерывно совершают скачкообразные колебательные движения; и, помимо всего, у нас *два* глаза!

## 68. Ночная близорукость ***)

Если вы часто совершаете прогулки в сумерки, то вы могли заметить, что с наступлением темноты становитесь все более близорукими, и очертания пейзажа перестают быть резкими. Легко измерить изменения аккомодации ваших глаз. Предположим, что в течение дня ваши глаза в спокойном состоянии и не приспосабливаясь специально (возможно, при помощи очков), создают резкие изображения далеких предметов. Если при этом в сумерки вы не можете увидеть в фокусе предмет, расположенный далее 1 *м*, это означает, что вы стали близоруки и ваша близорукость измеряется 1 диоптрией. Если границей служат 2 *м*, это соответствует 1/2 диоптрии. В общем ночная близорукость составляет около 0,6 диоптрии, но часто достигает и двух диоптрий. Это явление усиленно изучалось в последнее время.

Было предложено два объяснения:

1. Когда освещенность падает, зрачок глаза расширяется и края хрусталика начинают играть большую роль в образовании изображения, но эта краевая зона деформирована и «близорука» по сравнению с центральной частью — ночная близорукость вызывается, таким образом, *сферической аберрацией* глаза.

2. В дневное время глаз чувствительнее к желтому, в то время как в сумерки максимум чувствительности смещается к сине-зеленому (см. § 89). Глаз, как и любая линза, преломляет сине-зеленые

---

*) A. J. M. Wanders, Hemel en Dampkring **51**, 4, 1953.

*) На рис. 71 δ и η — звезды с величинами $3^m,6$ и $2^m,2$.

***) См., например, M. Koomen, R. Scolnik, R. Tousey, J. Optic Soc. Amer. **41**, 80, 1951 и **43**, 27, 1953; Ivanov, J. Optic. Soc. Amer. **45**, 769, 1955 Второе объяснение предложено V. Ronchi (Флоренция).

лучи сильнее, чем желтые; следовательно, мы становимся близорукими по отношению к сине-зеленым лучам из-за *хроматической аберрации* глаза. Это объясняет около 0,5 диоптрии. Если же ночная близорукость больше, необходимы другие объяснения.

## 69. Несовершенные изображения, создаваемые глазом

Звезды кажутся нам небольшими фигурами неправильной формы, часто как бы точками, из которых расходятся лучи. Обычное изображение звезды с пятью ее лучами не соответствует действительности. Для опыта выберем самую яркую звезду, например Сириус, или, еще лучше, планету — Венеру или Юпитер, поскольку видимый диск их настолько мал, что практически неотличим от точки, а блеском они превосходят самые яркие звезды.

Наклоним голову сначала направо, потом налево; соответственно наклонится и изображение звезды. Для каждого человека и даже для каждого глаза это изображение различно, но если закрыть один глаз рукой и смотреть другим на разные звезды, изображение всегда будет иметь ту же форму. Отсюда следует, что неправильными выглядят не сами звезды, но что наши глаза ошибаются и не воспроизводят точку как точку.

Когда мы находимся в темноте и зрачок широко раскрыт, изображение звезды увеличивается и становится менее правильным. Оно уменьшается при хорошем освещении, когда зрачок сужается до крохотного отверстия. Действительно, Галлстранд доказал, что форма хрусталика искажена у краев,—там, где к нему прикреплены мускулы, и когда свет проходит вблизи этих краев, четкость изображений уменьшается.

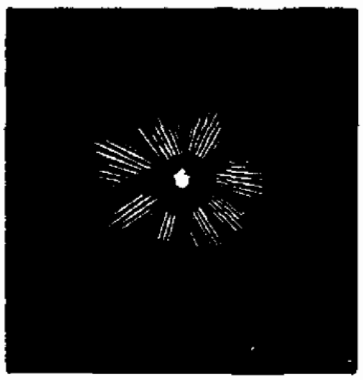


Рис. 82. Звезда или далекая лампа, какой ее видит без очков близорукий человек.

Возьмем листок бумаги, проколем в нем отверстие диаметром 1 *мм* и поместим его перед зрачком. Поискав немного, мы непременно найдем Сириус или какую-нибудь планету и убедимся, что изображение их совершенно круглое. Затем передвинем это отверстие к краю зрачка. Световая точка расплывется; у меня, в частности, она вытягивалась в линию по радиусу зрачка.

На месте обычного кончика лунного серпа многие видят несколько кончиков. Эти отклонения обычно приписываются небольшим деформациям поверхности роговицы (см., однако, § 43!). Подобные же искажения возникают у близорукого человека, когда он снимает очки (рис. 82): каждая далекая лампа становится для него световым кругом, внутри которого яркость, впрочем, весьма неодинакова. Если в это время идет дождь, вы увидите тут и там

маленькие круглые пятна, появляющиеся внезапно на фоне этих световых кругов: это значит, что часть роговицы закрыта дождевой каплей (рис. 83). Пятно сохраняет форму секунд десять,— если, конечно, все это время вы не будете моргать.

Когда издали в упор светят ослепительные автомобильные фары, все поле зрения вокруг яркой световой точки затянуто светлой

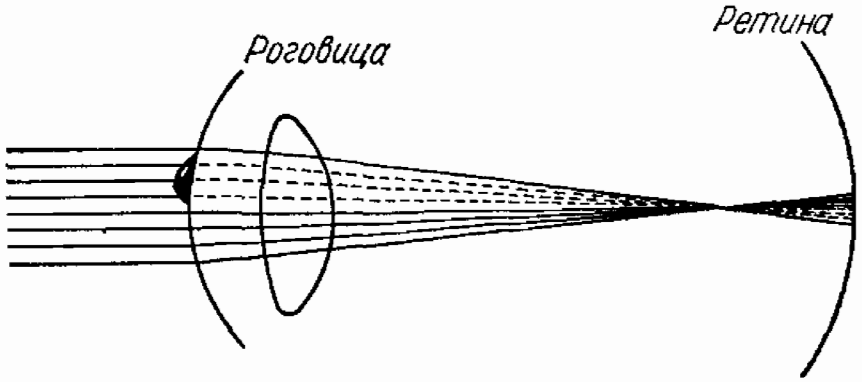



Рис. 83. Близорукий глаз без очков видит далекие лампы как маленькие диски неправильной формы; дождевая капля на роговице проектируется как темное пятно.

дымкой, которая кажется зернистой, а иногда — заштрихованной радиальными полосами. Это обусловлено дифракцией или преломлением света на неправильностях внутри нашего глаза. Натриевые лампы, имеющие форму длинных узких трубок, также создают рассеянное сияние вокруг источника света, но с тонкой штриховкой, строго параллельной этому источнику, поскольку каждое зерно, вызывающее дифракцию, обусловливает здесь появление линии, а не точки.

## 70. Пучки лучей, которые кажутся исходящими от ярких источников света

Временами кажется, будто дальние лампы бросают в глаза длинные прямые лучи, в особенности, если глядеть на них прищурившись. Вдоль краев века слезная жидкость образует небольшой мениск, в котором преломляются световые лучи *). Как показано на рис. 84, *а*, лучи преломляются у верхнего века так, что кажутся идущими снизу, и источник света получает обращенный книзу «хвост». Подобным же образом у нижнего века возникает световой «хвост», направленный вверх. Появление этих «хвостов» можно хорошо проследить, если, закрыв один глаз, медленно прикрывать другой, или поднимать и опускать голову, держа полузакрытыми оба глаза. Лучи появляются в тот самый момент, когда веко начинает закрывать зрачок, что легко заметить близорукому человеку, так как источник света, который представляется ему расплывчатым кругом, в этот момент частично затмевается.

*) H. Meyer, Pogg. Ann. **89**, 429, 1853.

Лучи не вполне параллельны, даже если смотреть только одним глазом. Взгляните в упор на источник света, а затем поверните голову чуть вправо и скосите глаза так, чтобы снова увидеть этот источник. Теперь лучи направлены наклонно (рис. 84,б). Причина, по-видимому, состоит в том, что края век, там, где они пересекают зрачок,

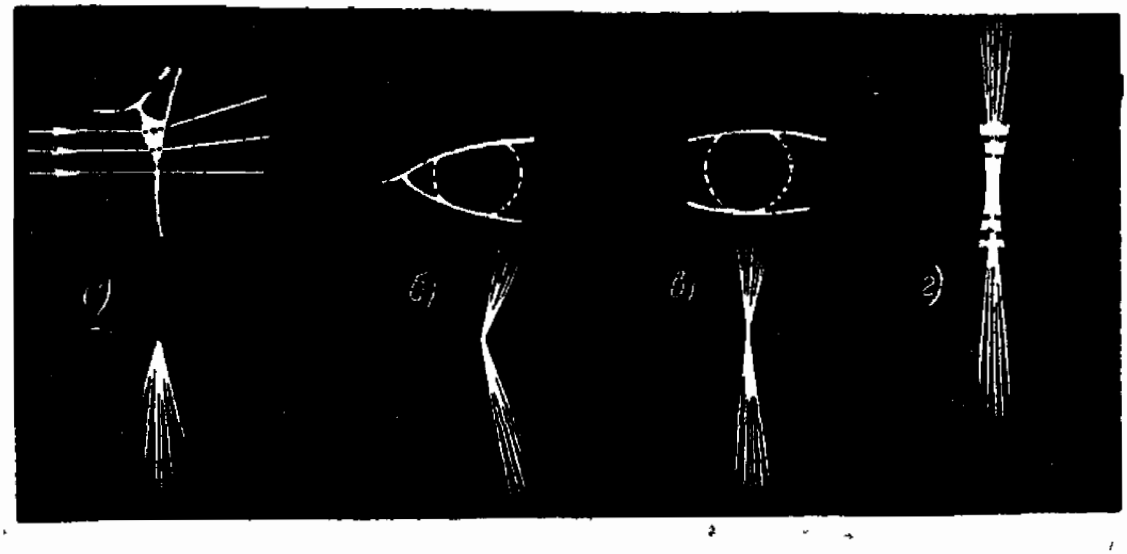


Рис. 84. Как возникают световые лучи вокруг далеких ламп.

уже не горизонтальны, и каждый пучок лучей располагается под прямым углом к краю века. Видимые направления лучей согласуются с этим объяснением. Теперь можно понять, почему лучи не параллельны, если смотреть прямо перед собой: кривизна век сказывается даже при малой ширине зрачка (рис. 84, *в*). Закройте пальцем правый край зрачка, и расположенные слева лучи исчезнут в пучке точно так, как это и должно быть.

Помимо длинных «хвостов», бывают короткие и очень яркие «хвосты», обусловленные отражением от краев век (рис. 84, *г*). Можно на опыте убедиться, что на этот раз верхнее веко порождает короткий верхний «хвост», и наоборот. Эти отраженные лучи создают обычно поперечную дифракционную картину.

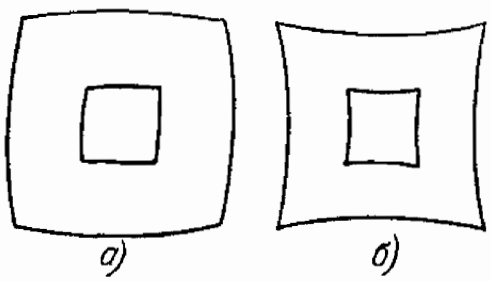



Рис. 85. Возникновение изображения сквозь очки: *а*) «бочонок», *б*) «подушка».

## 71. Явления, вызываемые очками

Если смотреть под углом сквозь обычные очки, линии оказываются искаженными. Искажение принимает форму «бочонка», если стекла вогнуты, и «подушки», если они выпуклы (рис. 85). Эта деформация особенно мешает, если нужно определить, является ли видимая линия строго прямой или вертикальной. На внешних границах поля возникает столь ярко выраженный астигматизм, что все мелкие детали скра-

дываются. Ошибки изображений заметнее для очков с более вогнутыми или более выпуклыми стеклами. Для менисковых стекол эти искажения меньше.

Если вечером поглядеть сквозь очки на зажженную лампу, можно увидеть «плавающий» поблизости от нее светлый круг. Он не очень

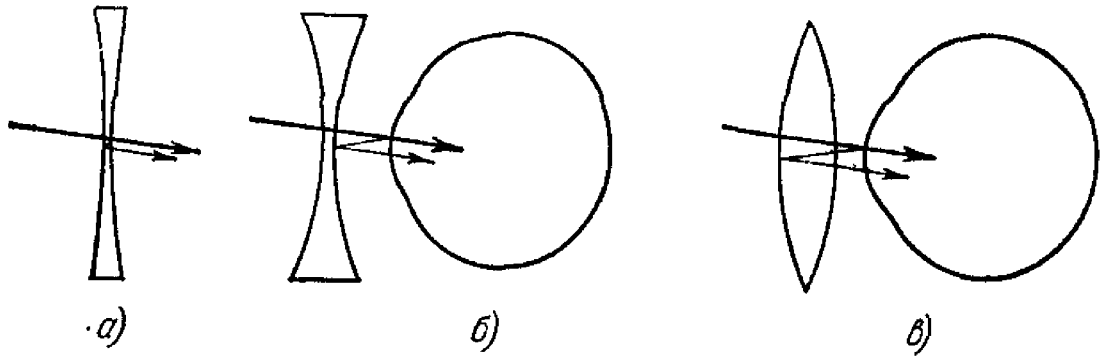



Рис. 86. Как возникает двойное отражение, если смотреть сквозь очки: *а*) слабые стекла; *б*) вогнутые стекла сильнее —5; *в*) выпуклые стекла сильнее +3.

четок, и если присматриваться подольше, аккомодация глаза автоматически изменится, и этот круг вырастет или уменьшится. Если снять очки и держать их на некотором расстоянии от глаз, круг превратится в светлую точку, которая, по-видимому, является уменьшенным во много раз изображением самой лампы. Если смотреть на группу из трех ламп, изображение окажется как бы подчеркнутым. Это объясняется следующим образом: светлый круг возникает в результате двойного отражения от поверхностей стекол или роговицы глаза. На самом деле, должны быть видны три круга, однако их можно различить лишь тогда, когда они не слишком расплывчаты. Практически при помощи каждой пары очков можно наблюдать только один случай двойного отражения (рис. 86) *).

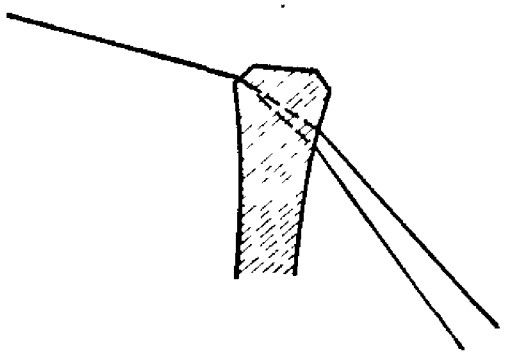


*Рис. 87. Как очки создают* спектр.

Стекла без оправы, если края их скошены, дают иногда вдоль края узкий спектр, вызванный далекими лампами (рис. 87).

О дождевых каплях на очках см. § 134.

## 72. Острота зрения

Нормальный глаз без всяких затруднений различает в созвездии Большой Медведицы звезды Мицар и Алькор, расположенные приблизительно на расстоянии 12′ одна от другой (рис. 71, 88).

*) W. J. de B r u y n e, Reflex 7, 7, 1936.

Насколько же острее может быть зрение? Человек с острым зрением может различить точки, находящиеся в два раза ближе, как, например, в двойной звезде α Козерога (ее компоненты 3,8 и 4,5 зв.

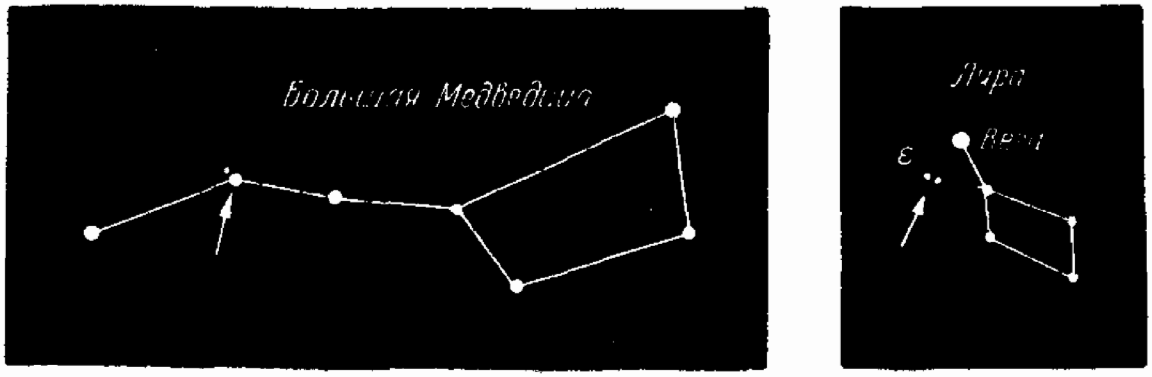



Рис. 88. Некоторые двойные звезды, далекие друг от друга, мо́гущие служить испытанием остроты зрения.

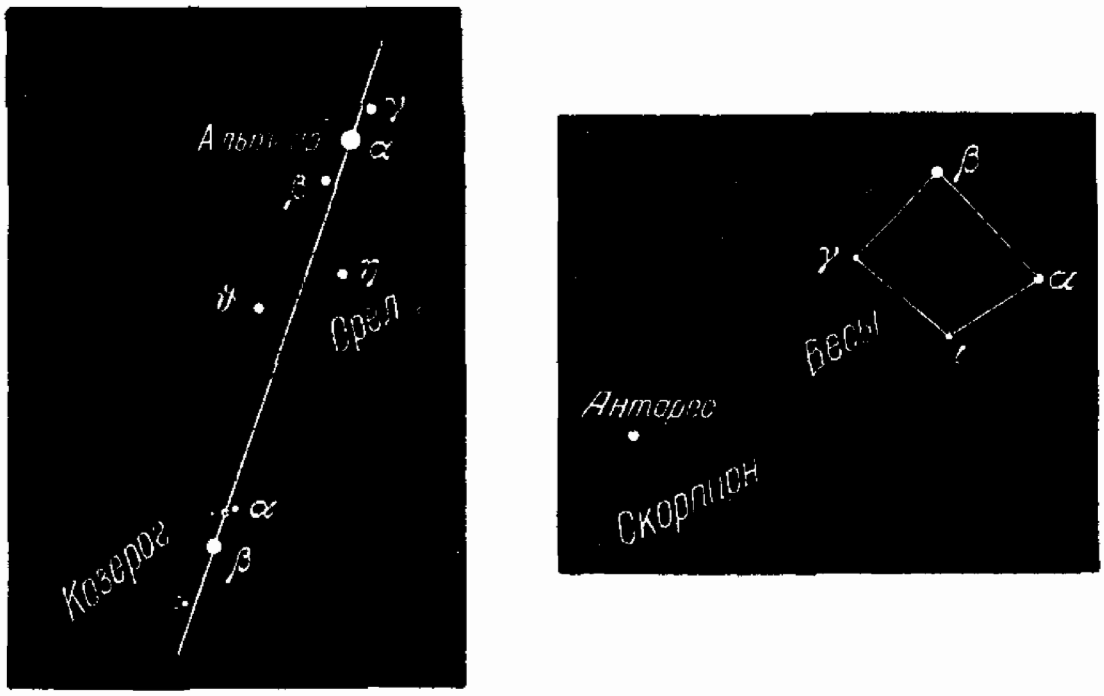



Рис. 89. Другие двойные звезды.

величины расположены на расстоянии 6′ друг от друга). Лишь немногие способны разрешить расстояние в 4′ и 3′ (рис. 88 и 89):

α Весов — расстояние между компонентами 2,8 и 5,3 зв. величины равно 4′;

ε Лиры — расстояние между компонентами 5,3 и 6,3 зв. величины равно 3′.

Особенно хорошие наблюдатели,— а таких очень мало,— при ясном небе и спокойной атмосфере могут различить невероятное количество подробностей. Один из них утверждал *), что видит невооруженным глазом α Весов как двойную звезду (расстояние около 4′).

*) Stoddart, Month. Not. Roy. Astr. Soc. 13, 156, 1852.

Сатурн казался ему сплющенным, а Венера — полумесяцем; в благоприятные моменты, когда он глядел на нее сквозь закопченное стекло или облако дыма, это выступало с особенной ясностью. Он мог увидеть даже двух спутников Юпитера, впрочем, только в сумерки, когда начинают появляться звезды первой и второй величины.

Сумерки — лучшее время и для других наблюдений. Например, подробности лунного рельефа заметны тогда много четче, нежели ночью, когда Луна больше слепит наблюдателя.

Небезынтересно попытаться обнаружить после новолуния узкий лунный серп так рано, как только это станет возможным. Практически это удается через 24 часа, хотя некоторые замечали серп через 11 часов *). Важно знать, конечно, куда смотреть.

Понаблюдайте за лицом кого-нибудь из ваших близких знакомых, идущего к вам навстречу издалека. Вначале вы видите «белое пятно», потом уже «какое-то лицо», но пока не видите отдельные его черты; затем различаете глаза и рот, но губы и брови пока не различимы; вот вы уже видите больше, чем три пятна; немного позднее вы замечаете, что лицо похоже на лицо вашего друга; потом вы уже твердо уверены, что это он.

Таким же образом и предмет, находясь от нас на далеком расстоянии, отличается от близлежащего предмета не только тем, что он кажется нам меньше, но он и меняется типичным для него образом. И повсюду на нем находятся отдельные детали, которые наш глаз различает неясно, но по которым мы угадываем структуру и характер предмета.

## 73. Чувствительность прямого и бокового зрения

Каковы самые слабые из видимых вами звезд? Посмотрите на ковш Большой Медведицы и сравните его с рис. 71. Большинство людей видит звезды до 6-й величины, некоторые — до 7-й. Все эти наблюдения следует проводить вдали от городских огней при ясном небе.

Постараемся теперь определить, какие звезды остаются видимыми, если пристально смотреть прямо на них. Нужна некоторая сила воли, чтобы не отводить взгляда и точно удерживать его на звезде. К вашему удивлению, любая слабая звезда исчезает, как только вы начинаете пристально в нее всматриваться; но достаточно чуть отвести взгляд, как она появляется вновь. Для меня, например, исчезают даже звезды 4-й величины, в то время как звезды 3-й величины остаются видимыми (ср. здесь рис. 71, 72). Следовательно, пороговые значения для желтого пятна и для окружающей сетчатки различаются на целые три величины, что соответствует шестнадцатикратной

*) A h m e d, Nat. Tijdschr. Ned. Ind. **98**, 48, 1938; Hemel en Dampkring **41**, 17, 1943; **44**, 217, 1946.

разнице в силе света. Это различие в чувствительности приписывается тому, что центральная часть желтого пятна почти целиком состоит из микроскопических клеток, имеющих форму маленьких колбочек, а окружающая сетчатка — из маленьких палочек, значительно более чувствительных. Даже опытные наблюдатели будут поражены этим эффектом: настолько привыкли мы непроизвольно отводить взгляд от звезды, чтобы лучше ее видеть.

Недавно было дано другое объяснение этому явлению *). Кажущаяся более высокая чувствительность периферии сетчатки была приписана непрерывным мелким движениям, которые совершает глаз, если взгляд не фиксирован непосредственно на источнике света: изображение тогда проносится над рядом соседних клеток и раздражения подкрепляют друг друга. Если бы взгляд был фиксирован, то центральная и периферическая чувствительность оказались бы почти одинаковыми.

Интересно проследить, как наш глаз адаптируется к темноте. Когда мы покидаем хорошо освещенную комнату и попадаем в темноту ночи, зрачок постепенно расширяется и достигает своего наибольшего диаметра приблизительно через минуту. Начиная с этого момента, мы видим звезды 3-й или 4-й величины (если внимательно фиксировать на них взгляд). Однако на периферии сетчатки мы воспринимаем постепенно все более слабые звезды, пока, спустя полчаса, снова не достигается предел. Отсюда следует, что колбочки остаются неизменными, но палочки приспосабливаются к темноте**). Для протяженных светящихся полей процесс протекает по-другому.

Стоит попытаться проследить на рассвете яркую звезду или планету (например, Венеру). По мере того, как светлеет небо, все труднее становится различать светлую точку; любопытнее всего, что нередко мы не замечаем ее только потому, что смотрим не в том направлении: будучи отыскана снова, она прекрасно видна. Можно осуществить такой же опыт, высматривая в небе поющего жаворонка. Если внимательно всматриваться, то часто удается проследить Венеру до тех пор, пока окончательно не рассветет, и затем видеть ее целый день. Иногда это можно проделать с Юпитером, что, однако, гораздо труднее; лишь в исключительных случаях удается наблюдать его к тому времени, как Солнце достигнет высоты 10°. Марс можно видеть лишь когда Солнце низко ***). Эти наблюдения целесообразнее всего проводить в то время, когда планета находится поблизости от Луны, которая служит прекрасным ориентиром при поисках на небосводе слабых светящихся точек. Не противоречат ли эти наблюдения выводу о сравнительно меньшей чувствитель-

*) Arden and Weale, J. of Physiology **125**, 417, 1954.
**) G. Patfoort, Ann. d'Optique oculaire **2**, 39, 1953.
***) Ann. d. Hydr. **37**, 1909; Hemel en Dampkring **14**, 60, 180, 1916; **17**, 68, 1919; Die Himmelswelt **44**, 70, 1934.

ности желтого пятна, сделанному нами в итоге опытов со звездами? Никоим образом. Палочки вступают в игру лишь при очень слабом свете и бездействуют в течение дня. Днем чувствительнее центральная ямка желтого пятна, ночью — внешние участки.

## 74. Опыт Фехиера

В день со светлыми легкими облаками выберем облако, едва заметное на фоне неба. Если держать перед глазами закопченное стекло или однородно засвеченную фотопленку, это же самое облако будет по-прежнему едва различимо.

Это привело Фехнера к заключению, что глаз способен различать две яркости, если их *отношение* (не *разность* между ними!) достигает определенной и постоянной величины (одна больше другой приблизительно на 5%).

Повторим опыт с о ч е н ь темным стеклом: облака больше не видно, и все тонкие оттенки света исчезли. Это показывает, что отношение едва различимых яркостей не является абсолютно постоянным.

Опыт Фехнера дополняется фактом исчезновения звезд при дневном свете. *Разность* между яркостями звезды и ее окрестностей всегда одна и та же, но *отношение* этих яркостей в дневное и в ночное время далеко не одинаково. Можно утверждать, что, как правило, наши зрительные впечатления определяются скорее отношением яркостей. В обыденной жизни эта особенность нашего зрения чрезвычайно важна: благодаря ей окружающие нас объекты возможно распознать даже при меняющихся условиях освещения.

## 75. Пейзаж при лунном свете *)

Если бы закон Фехнера действовал с абсолютной строгостью и глаз мог ощущать только отношения интенсивности, наше представление о пейзаже не менялось бы в зависимости от того, видим ли мы его при Луне или при солнечном свете. При Луне сила света в тысячи раз меньше, но предметы освещены таким же образом, а источник света практически имеет ту же форму и находится в том же положении.

Из этого ясно, что закон Фехнера теряет силу, когда яркости очень малы. Наблюдая пейзаж при Луне, обратите особое внимание на различия между дневной и ночной освещенностью. Наиболее характерно, что все участки, не освещенные полностью Луной, п о ч т и о д и н а к о в о т е м н ы, в то время как днем яркость этих

*) H. H e l m h o l t z, Optisches über Malerei (Populäre Wiss. Vorträge), 1871—1873.

участков заметно различается. Этим объясняется, почему отпечаток с недодержанного снимка освещенного Солнцем пейзажа напоминает пейзаж при лунном свете. Точно так же художники, рисуя ночной пейзаж, изображают почти все одинаково темным, и благодаря ослаблению контрастов у нас подсознательно создается впечатление, что на самом деле освещение должно быть очень слабым (см. также § 77).

### 76. Пейзаж при ярком солнечном свете *)

В летний день у моря яркость так велика, что почти ослепляет. Здесь отношения также кажутся меньшими, чем при обычном освещении, так как все представляется одинаково сверкающим в сиянии солнечных лучей. Этот эффект тоже часто используется художниками (ср. § 75).

### 77. Пороговое значение отношений яркости

Окна отражают солнечный свет и отбрасывают светлые пятна на мостовую (§ 8). Если Солнце освещает и мостовую, эти пятна увидеть трудно, так как поверхность мостовой не является ровной. Но светлое пятно сразу становится заметным, как только окно хотя бы немного передвинется, или когда ваша собственная тень скользнет над этим пятном. (Не примечательна ли эта психологическая особенность? Наш глаз, несомненно, обладает способностью обнаруживать слабые световые явления, если они движутся). Лист стекла отражает 4% каждой из своих поверхностей, т. е. всего 8%, и немного больше — для наклонно падающих лучей (§ 60). Поэтому в обычных условиях и без применения специальных средств возрастание яркости на 10%, очевидно, явится пороговым значением для нашего глаза.

При виде небольшой лужи перед залитой Солнцем стеной мы рассчитываем найти на стене пятно отраженного света. Однако, хотя полосы света и перебегают по стене, когда ветер рябит воду, самое пятно трудно будет заметить, если только поверхность стены не окажется исключительно гладкой. Увеличение яркости на 3%, таким образом, можно наблюдать лишь при очень благоприятных обстоятельствах.

Встаньте вечером между двух ламп, так близко к одной из них, чтобы исчезла тень, отбрасываемая другой. Установив расстояния до обеих ламп, можно получить отношение освещенностей и измерить тем самым разницу в яркости (в процентах), нужную для того, чтобы тень стала неразличимой (§ 59).

---

*) H. Helmholtz Optisches über Malerei (Populäre Wiss. Vorträge) 1871—1873.

## 78. Белые предметы ночью

Во время ночных прогулок у нас обычно появляется какое-то своеобразное и необычное впечатление, когда мы смотрим на светлые предметы окружающего нас пейзажа — такие, как дорога, покрытая гравием, снег, пена прибоя. Они кажутся нам удивительно яркими, во много раз ярче, чем при рассеянном дневном освещении. Иногда нам кажется, будто они излучают свет. Поэтому и сложилось мнение о «фосфоресценции» града и снега (§ 101, 254, 261). Здесь играет большую роль чувствительность палочек сетчатки нашего глаза к контрастам.

## 79. Действие вуали

Днем мы отправляемся гулять. Но почему прозрачные занавески мешают нам разглядеть, что происходит в комнатах домов? Эта вуалеподобная занавеска сильно освещена снаружи, и если предметы, находящиеся в комнате, обладают лишь малой долей этой яркости, то к однородной яркости вуали они добавляют слишком мало для того, чтобы их заметили. Это — применение закона Фехнера (§ 74).

Ночью, когда в комнате горит свет, сквозь занавеску все хорошо видно. Сторона занавески, обращенная к нам, практически не освещена и лишь немного увеличивает освещенность от предметов, находящихся в комнате и обладающих различной яркостью.

Для тех, кто смотрит из комнаты наружу, эффект в обоих случаях оказывается противоположным. С тем же явлением мы сталкиваемся, когда самолет, хорошо заметный при Луне, вдруг пропадает как только начинает светить прожектор. Воздух между нашим глазом и самолетом, освещенный ослепительным лучом, мешает нам различать слабые световые контрасты.

## 80. Цветные оконные стекла

*Стихи сравню с оконницей цветною!*
*С базара глянь в эту церковь — темно,*
*Там мрачно все, как в тумане...*
*Но только внутрь ее вошли,*
*Пред алтарем лишь преклонились,—*
*Как краски светом оживились,*
*Иконы, утварь засветились,*
*Так важно действуют лучи...*

*(Гете, Притча)*

Это явление сразу бросается в глаза. Даже в раскрашенных в огненные цвета стеклах исчезает их блеск, если в них смотреть с наружной стороны церкви. Именно такие стекла рассеивают свет (как и занавески), так как они, как правило, покрыты пылью и в

них много неровностей и шероховатостей. Падающий на них снаружи яркий свет в значительной степени отражается обратно и придает им общий серый оттенок, на котором слишком слабые отраженные лучи, идущие изнутри, почти не поддаются наблюдению.

## 81. Звезды в сумерках и при свете Луны *)

«Потухание» звезд при дневном свете — это также эффект «вуали». Вечером мы можем наблюдать за тем, как появляются на небе звезды, вначале самые яркие, потом постепенно увеличивается число менее ярких звезд, наконец, наступает ночь во всем своем великолепии. Наблюдать за всеми этими переходами исключительно увлекательно.

С одной стороны, мы знаем блеск звезд и имеем расчеты силы света (§ 53), а с другой стороны, знаем, как меняется яркость неба в зависимости от погружения Солнца под горизонт (§ 59).

Выберем участок неба для наблюдения, например вокруг Полярной звезды, и проследим за появлением первых звезд, по которым можно определить наступление сумерек.

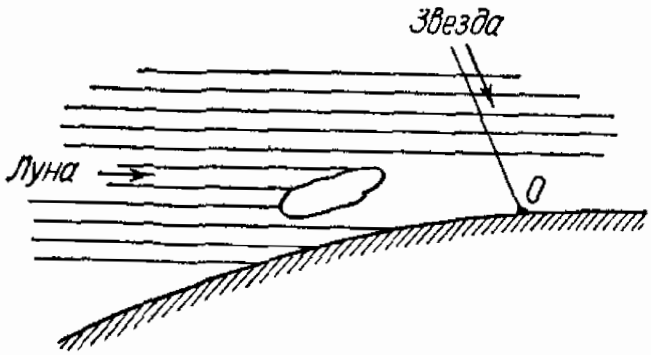



Рис. 90. Облака перед Луной недостаточно для того, чтобы наблюдатель *O* увидел звезды.

Вначале будет «фаза неуверенности»; мы можем увидеть какую-нибудь звезду, но стоит только отвести взгляд, как мы уже не в состоянии отыскать вновь эту маленькую точку. Эта фаза длится минут пять, после чего звезда становится «ярче» и уже не исчезает.

Отметим время и название этих первых звезд. Последнее не так уже просто сделать, но после нескольких вечеров подобного наблюдения удается вполне освоиться с картиной неба и безошибочно узнавать основные звезды. Легче вести эти наблюдения на рассвете, так как в это время отчетливее можно видеть звезды и проще определять, какие из них постепенно исчезают из нашего поля зрения.

Проводя подобные наблюдения при различных фазах Луны, мы можем изучить яркость неба при лунном освещении. Мы увидим, что во время полнолуния граница хорошо видимых звезд сдвигается примерно на две звездных величины.

Наблюдения едва видимых звезд позволяют вычертить график, показывающий, как распределяется яркость на небе вблизи Луны.

---

*) П. Паренаго, Астрон. журн. 7, 203, 1930; Smosarski, Ann. Inst. Phys. du Globe, Paris **22**, 70, 1945.

Звезды близ прекрасной Луны тотчас же
Весь теряют яркий свой блеск, едва лишь
Над землей она, серебром сияя,
Полная, встанет.

(Сафо, перев. В. Вересаева *))

Ребенку кажется, что достаточно облаку закрыть Луну, и звезды станут видны снова. Почему этого не происходит (рис. 90)?

## 82. Видимость звезд днем

Днем небо освещено еще сильнее, и звезды тогда совершенно невидимы. Больше того, наш глаз приспособился уже к яркому дневному свету и стал в тысячи раз менее чувствительным.

Еще со времен Аристотеля рассказывали, что если смотреть из глубокого колодца, ствола шахты или из высокой трубы, то воздух кажется более темным, чем обычно, и можно наблюдать самые яркие звезды. Об этом странном явлении упоминали многие писатели; правда, они полагались больше на воспоминания и рассказы.

В наши дни нет ни единого места, где бы можно было в нормальных условиях наблюдать это явление и изучать его. Кто хочет, может попытаться сделать это при помощи цилиндра длиной 1 *м* и диаметром 5 *см*. Можно подумать, что этот цилиндр уменьшит свет, приходящий извне и ослепляющий глаз. Это, однако, не очень существенно, так как расположенное прямо перед нами поле зрения остается освещенным, что и является решающим.

Еще более невероятен рассказ, будто днем можно увидеть звезды, отраженные в темном горном озере. «Наблюдатели» этого явления, отмечавшие, что отражение неба было очень темным, начисто забывали о том, что благодаря отражению свет звезд убывает в той же пропорции.

К утру стало темнее, так как звезды потухли, а восходящая заря еще не могла возместить эту потерю света.

(Вальтер Скотт, Веверлей)

## 83. Иррадиация

При заходе Солнца нам кажется, будто в этом месте углубляется линия горизонта (рис. 91).

Когда после новолуния появляется лунный серп, а остальная часть диска слабо светит пепельным светом, нас поражает, что обвод полумесяца кажется частью окружности большего радиуса,

*) Обратите внимание на редкую наблюдательность: «близ Луны» «теряют свой блеск», так как, когда восходит Луна, исчезают видимые до тех пор звезды.

нежели окружность пепельного диска (рис 91) Согласно оценке Тихо Браге, отношение их диаметров составляет 6 5

Точно так же темные платья делают нас более худыми, чем белые.

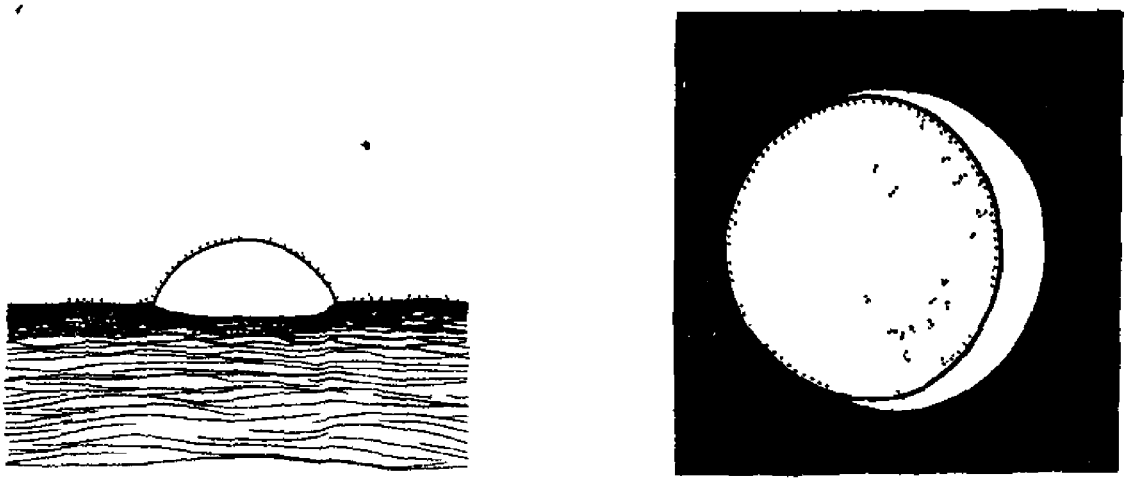


Рис 91 Примеры иррадиации заходящее Солнце и серп молодой Луны

В своих записках Леонардо да Винчи говорит об этом явлении: « когда Солнце видимо за безлиственными деревьями, все их ветви, находящиеся против солнечного тела, настолько уменьшаются, что становятся невидимыми, то же самое произойдет и с древком, помещенным между глазом и солнечным телом Я видел женщину, одетую в черное, с белой повязкой на голове, причем последняя казалась вдвое большей, чем ширина плеч женщины, которые были одеты в черное Если с большого расстояния рассматривать зубцы крепостей, отделенные друг от друга промежутками, равными ширине этих зубцов, то промежутки кажутся много большими, чем зубец » *)

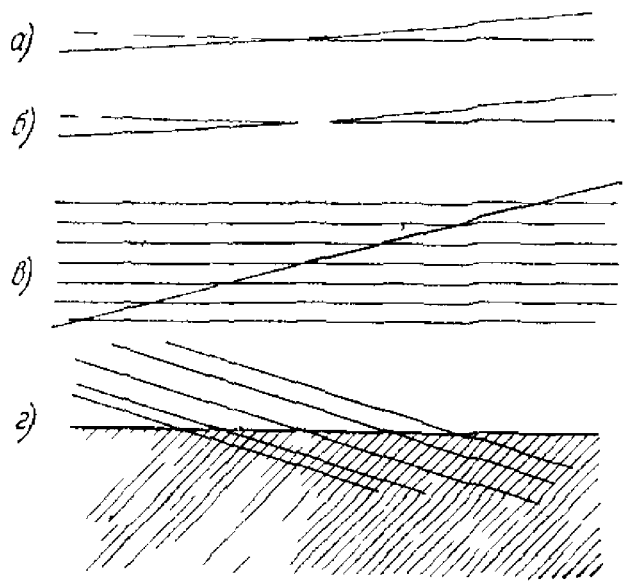



Рис 92 Примеры иррадиации при наблюдении телеграфных проводов

Нередко можно видеть, как два телеграфных провода пересекаются под очень малым углом, стоит лишь взглянуть в определенном направлении (рис 92, *а*) Примечательно, что на фоне неба точка пересечения в окружающем ее ярком сиянии исчезает под влиянием двойной линии темных проводов справа и слева Когда ветер немного

*) Переводы фрагментов Леонардо да Винчи здесь и далее даны по изданию «Книга о живописи мастера Леонардо да Винчи, живописца и скульптора флорентинского» (пер А А Губера и В К Шилейко), ОГИЗ—Изогиз, 1934

колеблет провода, белый просвет перемещается взад и вперед вдоль них (рис 92, *б*) Напротив, если фоном оказываются параллельные темные линии, например черепичные крыши или кирпичная кладка, возникает совсем другое впечатление провода кажутся странно утолщенными и сломанными там, где они пересекают каждую из темных линий Этот эффект наблюдается и в том случае, когда провода накладываются на четкий контур строения (рис 92, *в* и *г*), короче говоря, всюду, где прямой край какого-либо массивного предмета перерезает ряд параллельных линий

Причина всех этих отклонений заключается в том, что изображение в нашем глазу искажается вследствие дифракции и несовершенного воспроизведения Мысленно мы проводим границы между участками с наиболее быстро меняющейся яркостью, и когда изображение расплывается из-за дифракции, эти границы перестают совпадать с идеальными геометрическими линиями В случае светлых пятен на темном фоне граница систематически сдвигается наружу, и этот сдвиг известен под названием «иррадиации» Отдельные примеры иррадиации и были сейчас приведены

## 84. Слепящее действие света

Когда интенсивность света слишком велика, свет «слепит» нас Мы вкладываем в это понятие двойной смысл а) появление в поле зрения сильного источника света, в результате чего часть этого поля нельзя уже как следует наблюдать и б) чувство боли или головокружения

Примером слепящего действия в первом смысле может служить действие фар приближающегося автомобиля Мы не различаем уже деревьев, растущих вдоль дороги, и чуть ли не налетаем на них Всматриваясь более внимательно, мы обнаруживаем, что все покрыто светлой дымкой, во много раз более сильной, нежели неясные очертания деревьев и других видимых ночью предметов Эта всеохватывающая дымка обусловлена рассеиванием лучей в преломляющей среде глаза, всегда достаточно зернистой и неоднородной Представляется даже, что слепящий свет проникает в глаз не только через зрачок, но частью и через роговицу *)

Второе ощущение, вызванное слепящим действием света, проявляется особенно четко, когда мы смотрим на небо в полдень Мы предпочитаем укрываться в тени, чтобы не смотреть прямо на Солнце Чем ближе наш взгляд к этому небесному телу, тем нестерпимее неистовое сияние, и если есть еще белые облака, этот блеск с трудом переносим Примечательно, насколько велика разница в чувствительности к этому болевому ощущению у разных людей

*) G A Fry and M Alpern, J Optic Soc Amer **43**, 189, 1953

# ЦВЕТА

*Все живое стремится к цвету.*
*(Г е т е, Теория цветов)*

Во время наблюдений мы описываем бесчисленное количество раз *цвета́* явлений природы. В большинстве случаев мы используем для обозначения цвета такие термины, как красный, оранжевый, желтый и т. д., а по мере необходимости добавляем: насыщенный, ненасыщенный, бледный Благодаря этим обозначениям нами характеризуется цвет во всем его разнообразии. Когда мы говорим о яркости цвета (темный или светлый), мы имеем в виду его густоту, которая не меняет оттенка.

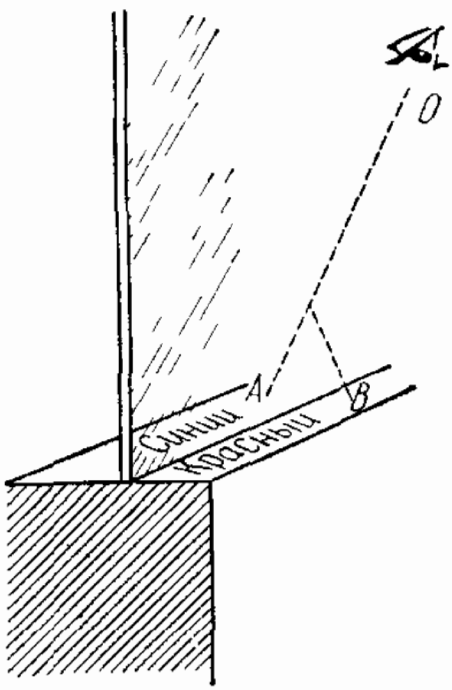



Рис. 93 Смешение цветов, наблюдаемое в магазинной витрине

## 85. Смешение цветов

Глядя в окно железнодорожного вагона, мы можем увидеть не только открывающийся за ним пейзаж, но также слабое отражение пейзажа, проносящегося за противоположным окном Эти два изображения накладываются одно на другое, так что можно наблюдать смешение цветов. Отражение синего неба делает зелень полей сине-зеленой, причем комбинированный цвет становится более бледным и менее насыщенным, что вообще присуще смешению цветов.

Стекла в магазинные витрины часто вставляются без рам, поэтому из точки $O$ можно видеть сквозь стекло внутреннюю часть подоконника $A$ и в то же время — отражение его внешней части $B$ (рис. 93). Если $A$ и $B$ окрашены по-разному, мы имеем прекрасный пример смешанных цветов, и с перемещением глаза вверх и вниз комбинированный цвет будет соответственно приближаться к цвету $A$ или к цвету $B$. Одновременно это показывает, что оконное стекло при больших углах падения отражает больше света.

Природа еще и по-другому смешивает для нас цвета. Издалека цветы на лугу принимают один-единственный тон; одуванчики на зеленой траве могут создать смешанный желто-зеленый цвет Цветущие яблони и груши — грязно-белые (действительно грязно-белые!); эта цветовая смесь возникает от розовых и белых лепестков, зеленых листьев, красных тычинок у груш и желтых у яблонь и т. д.

Крыши современных вилл часто покрывают черепицей различных цветов, но издалека мы видим лишь один какой-то оттенок, не различая отдельные цвета. Физика объясняет подобное смешение цветов тем, что в нашем глазу каждая световая точка изображается более или менее расплывшейся (ср. § 69) и что пятна различного цвета накладываются одно на другое. Художники-пуантилисты воспользовались этим физиологическим фактом.

## 86. Отражения и игра цвета

В книге о живописи Леонардо да Винчи говорит: «Если ты будешь изображать белое тело, окруженное большим количеством воздуха, то обращай внимание на цвета противостоящих ему предметов, потому что белое не имеет в себе никакого цвета, но частично окрашивается и переходит в цвет, ему противостоящий. Если увидишь в открытой местности женщину, одетую в белое, то та ее сторона, которая будет видна Солнцу, будет настолько светлого цвета, что на нее будет даже несколько больно смотреть, как на Солнце. А та ее сторона, которая будет видима воздуху, освещенному солнечными лучами, в него вплетенными и его пронизывающими, покажется отливающей в синий цвет, вследствие того, что воздух сам по себе синий. Если же на близкой поверхности Земли будет луг, и женщина очутится между лугом, освещенным Солнцем, и самим Солнцем, то ты увидишь, как те части складок, которые могут быть видимы лугу, окрасятся лучами, отражающими цвет этого луга».

## 87. Цвета коллоидных растворов металлов. Фиолетовые оконные стекла

Окна в некоторых старых домах имеют великолепный фиолетовый оттенок. Этот оттенок появился в результате многолетнего облучения стекла Солнцем. В настоящее время тот же процесс окраски можно воспроизвести много быстрее, подвергая стекло интенсивному облучению кварцевой лампой. Фиолетовый цвет можно отнести за счет ничтожных количеств марганца, образующего в стекле коллоидный раствор. Оттенок этого цвета зависит не только от оптических свойств металла, но также и от размера частиц. При нагревании фиолетовый цвет исчезает.

По свидетельству Фарадея, в его время стекло приобретало сильный фиолетовый оттенок после того, как Солнце освещало его в течение всего шести месяцев *). Быстрее всего такое окрашивание появляется в горных районах.

## 88. Цвет газосветных трубок; поглощение света в газах

Огни многочисленных цветных реклам, преображающих по ночам наши города в сказочные,— это стеклянные трубки, заполненные сильно разреженным газом, сквозь который проходит электрический разряд. Оранжевый цвет дают трубки, заполненные неоном, синий и зеленый — трубки, заполненные парами ртути и изготовленные из синего или зеленого стекла, чтобы соответственно ослабить другую компоненту ртутного света; наконец, желтый цвет дают гелиевые трубки из желтого стекла.

Примечательны прямые синие газосветные трубки. Если смотреть вдоль оси трубки, стоя близко к ней, то можно заметить изменение в оттенке свечения: цвет будет с и н е - ф и о л е т о в ы м; если же смотреть в перпендикулярном направлении, он будет скорее с и н е - з е л е н ы м. Это объясняется тем, что ртутный свет, проходящий сквозь стекло трубки, состоит преимущественно из трех излучений — фиолетового, синего и зеленого, причем первое — самое слабое. Совокупное их излучение сквозь тонкий слой газа создает в нашем глазу ощущение сине-зеленого цвета. Но если смотреть сквозь очень толстый слой газа, например, вдоль трубки, то свет из дальнего конца должен проделать долгий путь через пары ртути, прежде чем он достигнет нашего глаза. На этом пути поглощение зеленого света много сильнее, чем синего, так что отношение излучений становится совсем иным и соответственно меняется оттенок.

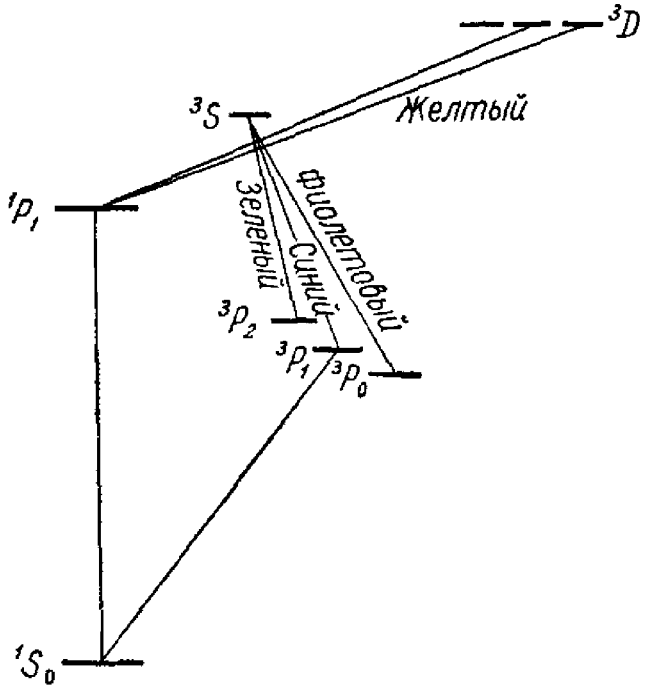



Рис. 94. Электронные переходы в атоме ртути, обусловливающие ее видимый спектр.

Зеленые, синие и фиолетовые линии ртути вместе образуют триплет, возникающий вследствие переходов между уровнями $^3P$ и $^3S$ (рис. 94). Зеленые и фиолетовые линии образуются при переходах на метастабильные уровни $^3P_2$ и $^3P_0$, с ко-

*) Experim. Res. in chem phys., p. 142.

торых электрон уже не может легко перескочить на низшие энергетические уровни. Поэтому число атомов с электронами на этих уровнях всегда аномально велико, и поглощение очень сильно.

По той же причине зеленые трубки, если смотреть вдоль них, приобретают более желтый оттенок. Здесь опять-таки особенно сильны два излучения, а именно — зеленые и желтые линии ртути. И снова наши наблюдения подтверждают, что из этой пары зеленый свет поглощается сильнее.

## 89. Эффект Пуркинье. Колбочки и палочки

Леонардо да Винчи отмечал, что «зеленый и голубой усиливают свой цвет в полутени, а красный и желтый выигрывают в цвете в своих освещенных частях, и то же самое делает белый».

Обратите внимание днем на контраст между пламенно алой геранью в бордюре газона и фоном из темно-зеленых листьев. В сумерки и поздно вечером этот контраст совершенно противоположен: цветы кажутся теперь много темнее листьев. Возможно, вас удивит сравнение яркости красного с яркостью зеленого цвета, однако различия выражены здесь настолько хорошо, что сомнениям нет места.

Если в картинной галерее найти красный и голубой цвета, которые днем представляются одинаково яркими, то в сумерки можно обнаружить, как голубой цвет становится ярче до такой степени, что кажется, будто краска светится.

Все это — примеры *эффекта Пуркинье*, который обусловлен тем, что при нормальном освещении наши глаза видят посредством так называемых «колбочек», а при очень слабом — посредством других клеток сетчатки — «палочек». Первые чувствительнее к желтому цвету, вторые — к сине-зеленому, и этим объясняется изменение отношения яркостей различно окрашенных предметов в случае изменения освещенности. Палочки дают нам впечатление света, а не цвета. Удалитесь подальше от городского освещения. Вначале вам ночь покажется очень темной; потом, когда ваши глаза привыкнут к темноте (в работу включаются палочки), вы начинаете различать окрестности. Взгляните на сильно окрашенную бумагу — она вам покажется бесцветной. Красный лист бумаги вам покажется черным, а голубой и фиолетовый — серо-белыми. Мы становимся цвето-слепыми!

В то же время на небе появятся тысячи звезд со своим серебристым блеском. Если смотреть на них пристально, то большинство из них исчезнут, а останутся лишь самые яркие, которые будут казаться нам маленькими световыми точками (§ 73). Эти наблюдения лучше всего проводить в темные ночи, но и при лунном освещении ландшафт становится для нас, если можно так сказать, «палочным ландшафтом».

### 90. Цвет очень ярких источников света приближается к белому

В городах или селениях мы можем часто наблюдать, как по вечерам различные источники света отражаются в воде каналов, вытягиваясь в светлые полосы (§ 17). Поразительно, с какой легкостью обнаруживаются теперь различия в цвете между газовыми и электрическими фонарями, в то время как сами по себе эти источники света выглядят почти одинаково белыми. Точно так же различия в цвете становятся отчетливее, когда фонари видны сквозь туман или сквозь запотевшие окна. Но если свет сконцентрирован в одной точке, обладающей значительной яркостью, то благодаря свойству нашего глаза цвет источника приближается к белому.

### 91. Впечатление от пейзажа, рассматриваемого сквозь цветные стекла

В «Теории цветов» Гете говорит, что желтый цвет «радует глаз, расширяет сердце, бодрит дух, и мы сразу ощущаем тепло». Многим хочется смеяться, когда они глядят сквозь желтое стекло. Синий цвет «представляет все в печальном свете». Красный «придает пейзажу страшный вид. Вот цвет, который покроет небо и Землю в Судный день». Зеленый выглядит очень неестественно, скорее всего потому, что небо крайне редко бывает зеленым. Воган Корниш пытался разграничить природные цвета на дающие ощущение «тепла» и ощущение «холода». Он нашел, что красный, оранжевый, желтый и желто-зеленый принадлежат к первой группе, а сине-зеленый, синий и фиолетовый — ко второй *).

### 92. Наблюдения цвета с опущенной головой

Художникам давно известно, что пейзаж кажется сочнее и богаче красками, если, повернувшись к нему спиной, наклониться и рассматривать его между расставленными ногами. Предполагается, что обострившееся чувство цвета связано с приливом крови к голове.

Я достигаю нужного эффекта, наклоняя туловище набок, а голову держа горизонтально. В таком положении можно, например, очень хорошо видеть тень Земли (§ 213).

Воган Корниш утверждает, что того же эффекта можно добиться, лежа на боку. Он приписывает это тому, что общеизвестная переоценка вертикальных расстояний нейтрализуется (§ 125), и оттенки резче переходят один в другой. Требуется еще выяснить, приложимо ли это объяснение к гораздо более сильному эффекту, возникающему когда мы рассматриваем пейзаж нагнувшись.

---

*) О психологическом восприятии природных цветов и оттенков см. V. C o r n i s h, Scenery and the Sense of Sight (Кембридж, 1935); K a n d i n s k i, Über das geistige in der Kunst (Мюнхен, 1933), B. J. K o n w e r, Colours and their Character (Гаага, 1949).

## 93. Длительность световых ощущений

Мы едем по железной дороге, а мимо проносится встречный поезд. Несколько секунд мы видим пейзаж сквозь окна этого поезда, и он виден отчетливо, почти без мелькания, лишь немного теряя в яркости.

Скорость движения поезда равна примерно 17 *м/сек*, значит, относительная скорость двух поездов, идущих в разные стороны, составляет 34 *м/сек*.

Положим, что окна совпадают друг с другом через промежутки, равные примерно одному метру. Изображения систематически прерываются на 0,03 *сек*, чего мы практически не замечаем, и световое впечатление сохраняется.

Стоя на платформе, можно смотреть сквозь окна мчащегося поезда или видеть пейзаж, отраженный в этих окнах, и если только мы смотрим прямо перед собой, изображение будет видно без мелькания. В этом случае продолжительность зрительного восприятия составляет 0,06 *сек*.

Попробуем установить, как часто должны чередоваться светлое и темное, чтобы исчезло мелькание. С этой целью пройдемся вдоль высокой и длинной изгороди, соразмеряя шаг так, чтобы освещение казалось постоянным, и стараясь в то же время смотреть сквозь изгородь в одном направлении.

Скорость, при которой исчезает мелькание, зависит от отношения яркостей светлого и темного, а также от соотношения между длительностью освещения и длительностью затенения. Конечно, на самом деле ощущение света пропадает не сразу, а ослабевает постепенно. Непрерывный процесс нарастания и ослабления световых ощущений в кино должен быть поэтому очень сложным.

Классическим примером служат падающие снежные хлопья. Леонардо да Винчи отмечал: «И снег вблизи нас кажется нам падающим быстро, а вдали — медленно. Ближний снег кажется нам непрерывной величиной, вроде белой нитки, а дальний кажется нам прерывным».

Дождевые капли, падающие много быстрее снежинок, всегда вытягиваются в длинные тонкие линии. Но я помню один случай,

когда можно было видеть в воздухе отдельные капли дождя. Это было в середине дня летом, когда шел грозовой дождь, но половина неба оставалась безоблачной, и лучи Солнца ярко освещали капли дождя. Полоса дождя проходила как раз через тень, отбрасываемую домами. Это было в сорока метрах от меня. За этой полосой дождя следовала узкая полоска шириною в несколько метров, освещенная Солнцем, а потом начинался темный фон группы деревьев. В полосе, освещенной Солнцем, можно было видеть большие светлые капли дождя, а поскольку эта полоса находилась на достаточно большом расстоянии от моих глаз, я хорошо видел, как, подобно стаям птиц, летели вниз эти светлые капли.

## 94. Явление «частокола» *)

Спицы быстро вращающегося колеса имеют совершенно неожиданный вид, если смотреть на них сквозь частокол. Как ни странно, рисунок симметричен, так что по нему невозможно определить направление вращения (рис. 95), и хотя колесо обладает быстрым поступательным и вращательным движением, наблюдаемая картина практически неподвижна. Это явление возникает особенно четко, если взглянуть сквозь изгородь или редкий забор на большие колеса паровоза, замедляющего ход на станции. Впечатление сильнее всего, когда обод освещен ярко, а спицы слабо, и щели между планками забора узки. Однако эффект не наблюдается, если смотреть сквозь забор на колесо, которое крутится на одном месте; требуется непременно сочетание вращательного и поступательного движения.

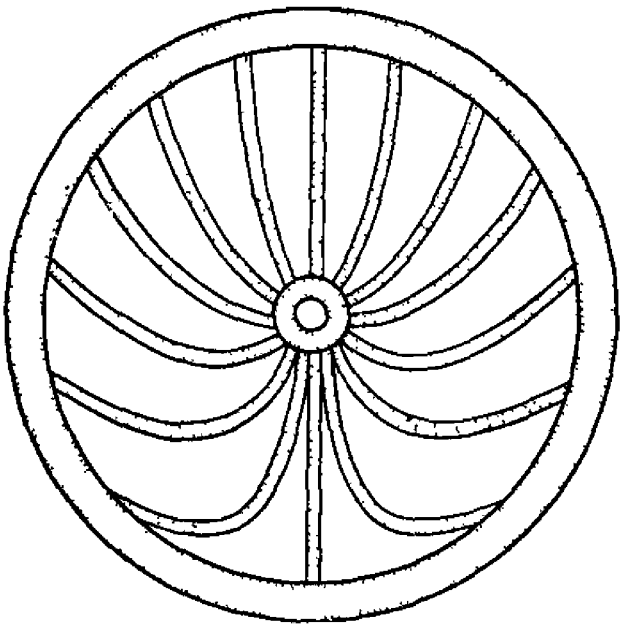


Рис. 95. Эффект «частокола»; катящееся колесо, видимое сквозь длинную изгородь.

Объясняя это явление, мы исходим из того, что наблюдатель, следуя глазами за колесом, связывает с ним все, что видит. Это обязательное требование, которое выполняется благодаря описанному выше способу освещения. Пусть колесо вращается вокруг неподвижной точки $O$, а щели в заборе равномерно перемещаются

*) P. M. Roget, Phil. Trans. **115**, 131, 1825; Plateau, Pogg. Ann. **20**, 319, 1830; L. Burmester, Berich Akad. München, 142, 1914; Bouasse, Formes et Couleurs, Paris, 1917, 230, Pohl, Mechanik, 187, Поль дает неправильное объяснение.

мимо него (рис. 96, *а*). Предположим, что в начальном положении какая-то щель пересекает определенную спицу в точке *A*; тогда скозь щель будет видна часть спицы, расположенная близ *A*. Немного спустя спица будет проходить уже по линии *OB*, а щель передвинется так, что они встретятся в точке *B*; еще позже точка пересе-

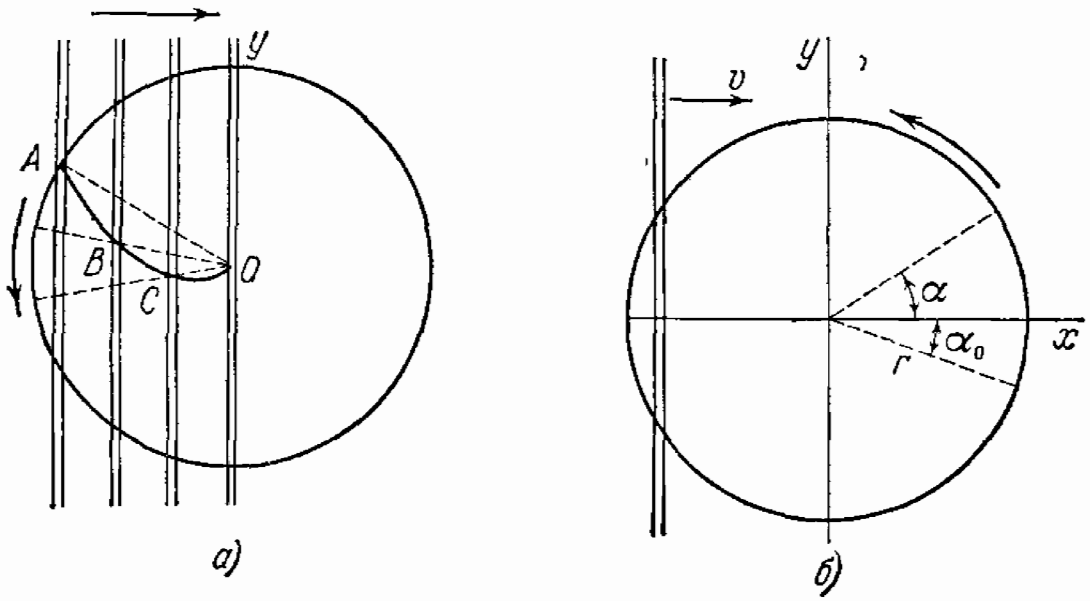



Рис. 96. Эффект «частокола».

чения переместится в *C*. Таким образом точка за точкой будет вычерчена кривая *ABCO*.

Следовательно, каждая наблюдаемая линия будет геометрическим местом точек, в которых на очень короткое время мы видим пересечение определенной щели и определенной спицы. Благодаря инерции зрительного восприятия вся кривая кажется нам видимой одновременно, при условии, что колесо вертится достаточно быстро.

Каждая следующая спица, проходя в свою очередь мимо той же щели, описывает кривую, принадлежащую к тому же семейству, но с другим параметром; это и означает, что перед глазами возникает полностью вся картина. Если следующая спица и следующая щель занимают соответственно место предшествующих за одинаковое время, то, очевидно, будет снова прочерчена та же серия кривых, и вся картина окажется неподвижной. Но если расстояния между щелями не совсем удовлетворяют этому условию, то каждая спица достигнет щели чуть раньше или чуть позже. В этом случае каждая кривая превращается в другую кривую того же семейства с другим параметром. Мы увидим тогда картину, медленно смещающуюся в направлении вращения или в противоположном, но это не есть вращение всей картины в целом, поскольку она остается симметричной относительно вертикали. Возможно, наконец, что расстояния между щелями будут много больше или много меньше, например, вдвое у́же. Тогда мы увидим вдвое больше кривых, чем имеется спиц, и

если промежутки чередуются регулярно, картина снова окажется неподвижной.

Из сказанного ясно, что чаще всего будут возникать медленно меняющиеся картины. Однако обычно изгородь бывает так коротка, что все явление длится лишь секунду или еще меньше, так что мы едва успеваем заметить какие-либо изменения. Лично мне это удавалось крайне редко.

Уравнение семейства кривых вывести легко. Возьмем оси координат, как показано на рис. 96, *б*, и обозначим буквой $v$ скорость щелей в заборе. Пусть $\alpha_0$ — начальный наклон радиуса-вектора (т. е. спицы) к оси $x$, $\alpha$ — наклон спустя промежуток времени $t$. Тогда координаты точки пересечения спицы и щели в момент $t$ будут:

$$x = vt, \quad y = x \operatorname{tg} \alpha.$$

Связывая вращательное и поступательное движение, мы при длине спицы, равной $r$, получаем:

$$\frac{vt}{r} = \alpha - \alpha_0 \text{ или } x = r(\alpha - \alpha_0).$$

Исключая $\alpha$, выводим уравнение семейства кривых:

$$y = x \operatorname{tg}\left(\frac{x}{r} + \alpha_0\right).$$

Как явствует из этого выражения, $y$ остается неизменным, когда $\alpha_0$ и $x$ одновременно меняют знак, что означает симметричность картины относительно оси $y$.

Один читатель сообщил мне, что это необычное явление он наблюдает каждый раз, когда ездит по мостовой на велосипеде рядом с другим велосипедистом и смотрит сквозь колесо его велосипеда на брусчатку мостовой.

Более сложные узоры возникают в том случае, если сквозь одно из больших колес повозки видно другое колесо. Когда взгляд отклонится немного вправо или влево, так что одно колесо уже не покрывает полностью другое, наблюдаются самые необычные кривые. Эти кривые, замеченные Фарадеем и напомнившие ему магнитные силовые линии, являются геометрическим местом точек пересечения двух спиц.

Интересно также наблюдать два колеса, одно непосредственно позади другого, вращающиеся с одинаковой скоростью и в противоположном направлении. Эту картину можно часто видеть над стволами шахт. Кажется, что есть только одно колесо и что оно покоится; если каждое колесо имеет $n$ спиц, темных на фоне неба, кажущееся колесо представляется имеющим $2n$ ярких спиц. Иногда изображение несколько поворачивается в одну или в другую сторону: это вызывается небольшими изменениями в скорости вращения колес. Это явление наблюдалось еще Фарадеем *).

*) J. Roy Inst. 1, 205, 1831.

## 95. Мерцающие источники света

Среди светящихся реклам, пылающих ночами в крупных городах, наибольшее внимание привлекают оранжевые неоновые трубки. Их питает переменный ток с частотой 50 герц. Это означает, что сила света меняется 100 раз в секунду, поскольку одному циклу соответствуют два световых максимума. Частота мерцаний настолько велика, что, как правило, мы совсем их не замечаем.

Но если какой-нибудь блестящий предмет двигать взад и вперед вблизи светящейся неоновой трубки, то его световой след окажется полосатым. Чем быстрее движется предмет, тем отчетливее полосы. Число полос позволяет определить частоту переменного тока. Например, если сверкающие ножницы описывают круг четыре раза в секунду, и световой след дает 12 максимумов, то частота импульсов тока равна $12 \times 4 = 48$, и частота переменного тока составляет 24 герца.

Этот опыт можно провести и с отражением источника света в быстро качающемся зеркале или куске стекла (например, в стекле ручных часов); можно также описывать стеклом от очков небольшой круг перед глазом (ср. § 47). Наконец, мерцание можно наблюдать простым глазом, если задержать взгляд на какой-либо точке вблизи неоновой трубки, а затем вдруг изменить его направление; в этом случае изображение источника движется по сетчатке, и каждый максимум воспринимается раздельно. Такое внезапное изменение направления взгляда оказывается неожиданно трудным делом. Иногда это удается, иногда — нет.

Рассмотрим также электрическую лампочку, питаемую переменным током. Если размахивать около нее металлическим карандашиком, можно ясно увидеть полосы, доказывающие, что свет и температура нити накала слегка возрастают при каждом импульсе тока и уменьшаются в промежутках (рис. 97). Если лампу питает постоянный ток, никаких полос вы не увидите.

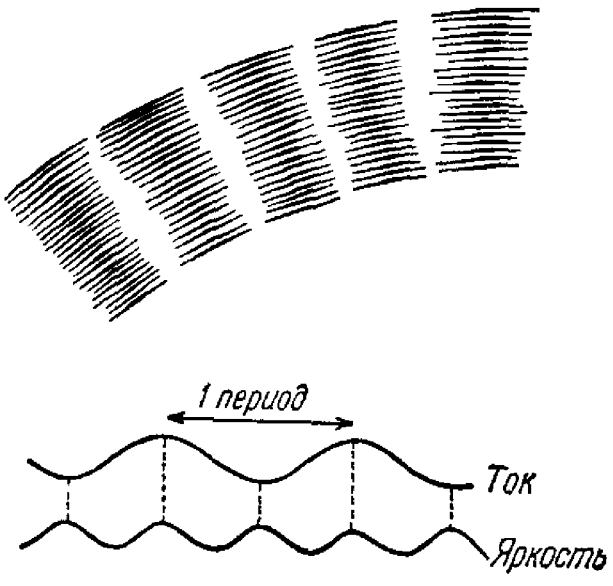



Рис. 97. Обнаружение быстрого мерцания света электрических ламп.

Если ночью глядеть из окна поезда на натриевые лампы, применяемые иногда для освещения улиц, окно иногда кажется ребристым, но лишь при тех условиях, что расстояние между окном и наблюдателем около 2 *м*, само окно — мокрое или запотевшее, и это влажное стекло слегка протерто в вертикальном направлении. Как только

свет от дальних фонарей упадет на эти участки стекла, становятся заметны полосы. Это объясняется тем, что водяная пленка не одинакова по толщине: благодаря протиранию образуется ряд тонких призм с вертикальными гранями и углами преломления, меняющимися от точки к точке, что и вызывает неправильные, подчас внезапные смещения в изображении фонарей. И если натриевые лампы питает переменный ток, мы увидим полосы, точно так же как в случае с быстро движущимся стеклом от очков.

Один из моих читателей отметил, что, проезжая на велосипеде по вымощенной брусчаткой дороге, освещенной натриевыми лампами, он совершенно отчетливо видел рисунок брусчатки (это относится к линиям, перпендикулярным к направлению дороги), хотя его скорость составляла около 18 *км/час*. Когда он увеличивал скорость, брусчатка, казалось, отставала; когда движение замедлялось, брусчатка как бы убегала вперед. По-видимому, лампы питались переменным током с частотой 50 герц, они вспыхивали 100 раз в секунду. За 0,01 *сек* велосипедист проезжал 5 *см*, что приблизительно равно ширине бруска. Изображение одного бруска накладывалось на изображение следующего и рисунок казался неизменным.

## §6. Предельная частота мельканий для центрального и периферического полей зрения

Там, где частота переменного тока низка (20—25 герц), можно осуществить следующий любопытный опыт. Посмотрите сначала на лампу, и вы увидите ровный свет, в то время как освещенная лампой стена будет мерцать. Затем взгляните на стену: ее освещение станет ровным, но теперь начинает мерцать лампа *).

Ясно, что воспринимающая способность центрального и периферического полей зрения неодинакова. Возможно, что колебания интенсивности лампы очень невелики, а порог чувствительности к различию интенсивностей у периферического поля меньше. Чтобы убедиться в этом, опишем каким-либо блестящим предметом круг вблизи той же лампы. Световой след, даже если пристально его рассматривать (ср. § 82), показывает ясно видимые колебания яркости с правильными промежутками. Это означает, что центральное поле зрения достаточно чувствительно к малым различиям интенсивности, но оно просто не поспевает за темпом колебаний.

Лабораторные исследования также подтвердили наличие этой особенности нашего глаза. Примечательным является тот факт,

*) Woog, C. R. Paris **168**, 1222; **169**, 93, 1919.

что эти мерцания не только наблюдаемы, но нам даже кажется, что их можно сосчитать, при этом у нас складывается ошибочное впечатление, что их число не превышает 10 в секунду (§ 99).

## 97. «Неподвижное» велосипедное колесо

Быстро вращающееся колесо велосипеда выглядит примерно так, как это изображено на рис. 98. Наш глаз может уследить лишь за движением тех частей спиц, которые прилегают к центру, поскольку они движутся медленнее. Усядемся, однако, поудобнее близ дороги, по которой всегда проезжает множество велосипедистов, и будем пристально смотреть на определенную точку дороги. В тот момент, когда колесо велосипеда появится в поле зрения, мы увидим вдруг совершенно ясно несколько спиц, даже если велосипед будет двигаться быстро. Это поразительное явление. Главное — постоянно смотреть в одном направлении и не следить за приближающимся велосипедом.

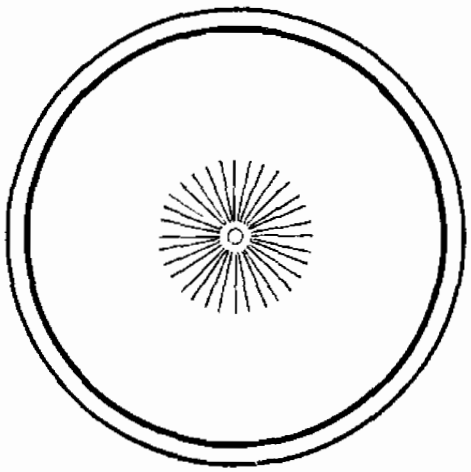


Рис. 98. Вот как выглядит быстро вращающееся велосипедное колесо.

Объясняется это тем, что та точка вращающегося колеса, в которой оно касается земли, на мгновение останавливается, так как земля задерживает колесо (рис. 99). Концы спиц возле этой точки тоже будут почти неподвижны, тогда как точки, отстоящие дальше

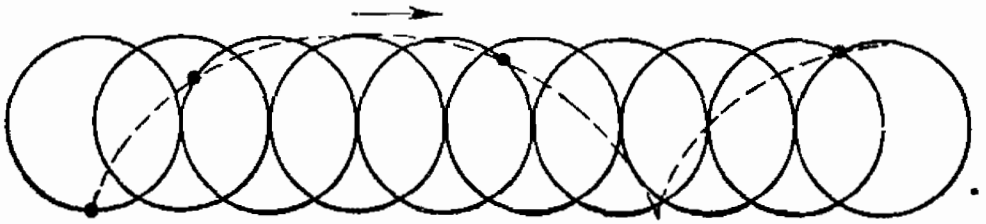


Рис. 99. Траектория точки на окружности катящегося колеса. В продолжение каждого оборота любая точка на миг останавливается. Это происходит как раз в тот момент, когда она касается земли.

от земли, будут быстро перемещаться по кривой, благодаря сочетанию вращательного и поступательного движения. Следовательно, если мы сумеем фиксировать взгляд в определенной точке на земле, то н и ж н я я ч а с т ь колеса покажется нам более или менее неподвижной. Это мы и наблюдаем.

Я полагаю, что спицы яснее всего можно увидеть в тот момент, когда они появятся в периферическом поле зрения. Таким образом, вполне возможно, что здесь играет роль наша способность схватывать быстрые изменения света.

## 98. «Неподвижное» автомобильное колесо

При движении автомобиля, даже с умеренной скоростью, спицы его колес различить невозможно. В каждой данной точке нашей сетчатки мелькание светлого и темного происходит так быстро, что ощущения сливаются друг с другом; мускулы глаза не могут заставить наш взгляд описать конус со скоростью, необходимой для того, чтобы следовать за отдельными спицами *).

Тем не менее, случается так, что спицы оказываются видимыми на какой-то бесконечно малый миг, как на моментальной фотографии. Как правило, можно видеть лишь некоторые спицы, но иногда мне казалось, что я отчетливо вижу целое колесо. В этом случае объяснение, данное в примере с неподвижным велосипедным колесом, уже не годится. Для столь поразительного случая пришлось бы допустить, что в некоторые моменты колесо на самом деле неподвижно; невозможность этого очевидна.

Вскоре, однако, обнаруживается, что мгновенная видимость спиц автомобильного колеса практически наблюдается в тот момент, когда вы твердо ставите ногу на Землю, либо когда вы постукиваете по очкам (если вы близоруки), либо когда вы резко поворачиваете голову. Не исключено, что в этих случаях глаз или направление нашего взгляда претерпевают очень быстрые затухающие колебания, которые иногда точно повторяют колебания движущихся спиц, так что изображения последних на сетчатке остаются на какой-то миг неподвижными. Быть может, ось глазного яблока совершает легкие колебательные движения. Возможно ли что глаз, получая небольшие сотрясения подобного рода, способен совершать очень быстрые беспорядочные повороты вокруг своей оси?

Рис. 100. Кривая, описываемая глазом при ходьбе.

Непосредственной проверкой теории вибрации глаза может служить следующий факт. Если ночью пройтись энергичным мерным шагом, удерживая взгляд точно на дальнем фонаре, то можно заметить, что свет его при каждом шаге описывает маленькую кривую, напоминающую более или менее рис. 100.

Это явление можно иногда наблюдать, если, стоя на месте, смотреть на проезжающий автомобиль. Объясняется оно внезапными легкими бессознательными движениями глаза. Тот факт, что нередко глаз смещается под влиянием маленьких толчков, подтверждается, если на мгновение и очень осторожно взглянуть на заходящее Солнце. Последовательные образы состоят тогда из нескольких черных пятен, а не из сплошной черной полосы.

*) В настоящее время колеса автомобилей, как правило, спиц не имеют: они представляют собой сплошные диски с небольшими прорезями у обода (для размещения вентиля от камеры). Однако все сказанное о наблюдении спиц относится и к наблюдениям этих прорезей, хотя и менее ясным.

## 99. «Неподвижный» пропеллер самолета *)

Кто имеет возможность летать на самолете, пусть обратит внимание на пропеллер. Когда он начинает крутиться, мы замечаем мелькание, которое появляется в результате того, что свет фона прерывается вращением пропеллера несколько раз в секунду. Скоро вращение станет таким быстрым, что фон будет казаться ровным. Отведите взгляд в сторону и посмотрите на пропеллер сбоку; вы опять увидите мелькание. Если ваш взгляд изменит немного свое направление, мелькание станет еще более заметным. Когда я закрываю левый глаз, то я прекрасно вижу мелькание правым глазом; мелькающее пятно будет смещено несколько вправо от пропеллера, если же я смотрю левым глазом, то оно будет левее самолета. Особенно интересно наблюдать за этим явлением при несколько замедленном вращении пропеллера, что обычно бывает при взлете, при подготовке к взлету и т. д. При подсчете числа мельканий мы заметно путаемся. В то время, как в центральном направлении мы насчитываем их до 25 в секунду, в периферийном поле едва различается 10 в секунду. Это явление подобно тому, которое мы уже наблюдали при мерцающей лампе (§ 95).

## 100. Наблюдения вращающегося велосипедного колеса

Как правило, спицы вращающегося велосипедного колеса по отдельности не видны, они сливаются в тонкую вуаль, более темную у центра и светлеющую к ободу. Тень от колеса на гладкой дороге дает подобное же распределение света. Как темна эта тень? Каждая спица имеет толщину 2 *мм*, а расстояние между ними у обода в среднем 50 *мм*. Время, в течение которого освещается расположенная на дороге точка, зависит от отношения прозрачной площади колеса к площади всего колеса; таким образом, мы можем записать:

$$\frac{\text{Время, в продолжение которого освещена дорога}}{\text{Время, в продолжение которого свет падает на колесо}} = \frac{50}{50+2} = \frac{50}{52}.$$

По закону Тальбота, это производит такое впечатление на наш глаз, как если бы тень, отброшенная вращающимся колесом, имела постоянную яркость, равную $\frac{50}{52}$ яркости незатененной дороги. Но лучи Солнца падают на колесо косо, так что тени спиц ближе друг к другу, хотя толщина их не меняется. Отсюда ясно, что даже у обода тень будет на целых 4—8% темнее, чем окружающий фон, а ближе к центру ослабление яркости, вероятно, достигает 10—20%. И все же какое-либо различие в яркости обнаружить трудно, ибо темная тень

*) H. S. Gradle, Science 68, 404, 1928.

обода слишком подчеркивает границу между двумя сравниваемыми полями. Постепенное ослабление яркости к центру едва заметно, поскольку мы всегда склонны рассматривать четко очерченную связную фигуру как единое целое, и эта психологическая тенденция берет верх над действительным различием в яркости.

При ближайшем изучении мы, однако, как правило, обнаруживаем одно или несколько световых дуг в тени колеса (рис. 101). Часто это незамкнутые, обрывающиеся кривые. Слезьте с велосипеда и разглядите внимательно, где образуется светлая дуга. Она соответствует пересечению двух спиц; действительно, в каждой из этих точек одна спица, так сказать, исчезает, и средняя затененность в результате должна уменьшиться. Но как мала эта разница! И все же наш глаз хорошо различает ее теперь, когда две яркости можно сравнить без разграничительной линии между ними. Трудно описать, как сочетаются спицы. Большей частью они объединяются в группы по четыре, и эти группы повторяются вокруг всего колеса. Точка пересечения двух спиц описывает кривую, которую мы видим как небольшую яркую дугу. После того, как колесо повернется более чем на четырехкратное расстояние между двумя спицами, снова образуется маленькая дуга. Больше того, если в каждой группе окажутся два пересечения, одно из которых следует по пути другого, эта маленькая дуга будет особенно яркой. В первом случае она будет на 1% ярче окружающей тени, во втором — на 2%. Однако поскольку тени спиц проектируются, как правило, теснее друг к другу и, кроме того, маленькая яркая дуга располагается часто в некотором отдалении от обода, повышение составит соответственно 3 и 6%. Указанные величины являются наименьшими различиями в яркости, которые еще воспринимаются, если сравниваемые поля непосредственно прилегают друг к другу. Хотя неровности дороги, играющей здесь роль экрана, являются серьезной помехой, результат хорошо согласуется с нашими предыдущими оценками (§ 72).

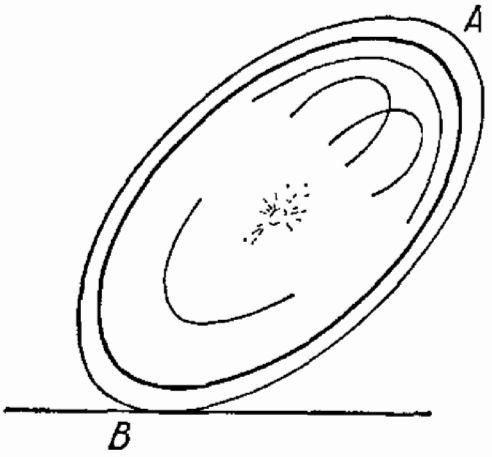



Рис. 101. Светлые или темные кривые во вращающемся велосипедном колесе.

Попытайтесь объяснить, почему световые дуги и кольца обычно ярче всего у конца *A* удлиненной тени колеса, и почему картина близ конца *A* и близ конца *B* неодинакова.

Если смотреть не на тень своего колеса, а прямо на колесо движущегося рядом велосипеда, то те же самые дуги и кольца видны гораздо яснее, так как теперь они не размыты и выделяются совер-

шенно отчетливо (см. § 2). На светлом фоне спицы представляются темными, так что дуги оказываются ярче. Но если колесо освещено Солнцем, а фон — темный, то дуги бывают темнее.

Без сомнения, это еще не последний из любопытных эффектов, которые создаются быстрым вращением велосипедного колеса. Если вы смотрите на *тень* колеса, и глазу удается совершить быстрый круговой поворот, так что взгляд бессознательно следует за тенью, может случиться, что вы внезапно на момент увидите четкие линии спиц (ср. § 98). Если вы носите очки, то достаточно незначительного внезапного смещения стекол, чтобы стали видны отдельные спицы, движущиеся странными толчками. Однако самую замечательную тень можно увидеть при езде на велосипеде по мостовой, мощенной брусчаткой. Несмотря на неровный фон, вы ясно видите радиальные, но искривленные линии, почти всегда в одной и той же части тени (рис. 102). Мы узнаем фигуру «явления частокола» (§ 94). Вы увидите ее лучше всего, смотря на тень колеса велосипедиста, едущего возле вас. Ясно, что линии пазов на брусчатке играют роль щелей забора, и очень вероятно, что в этих условиях наблюдатель смотрит пристально на само колесо.

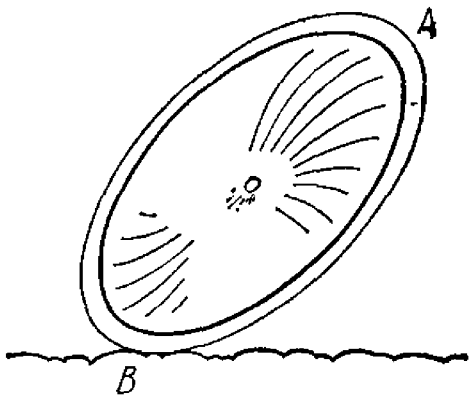



Рис. 102. Кривые линии в тени велосипедного колеса, движущегося по мостовой, мощенной брусчаткой.

Кроме описанных кривых, иногда можно наблюдать еще одну своеобразную световую кривую; ее можно видеть, однако, только в том случае, когда Солнце освещает велосипед со сверкающими новенькими спицами.

## 101. Последовательные образы

*Точно как странник, который, взглянув перед*
*самым закатом*
*Прямо на быстрое красное Солнце, после невольно*
*Видит его и на темных кустах и на скалах утеса*
*Перед очами: куда бы ни кинул он взора, повсюду*
*Светит оно и качается в красках чудесных,—*
*Так перед Германом образ возлюбленной девушки*
*Плыл...*

*(Гете, Герман и Доротея, Песнь VII)*

Во время этих наблюдений будьте очень осторожны! Не перенапрягайте глаза! Не проводите больше двух опытов подряд!

Осторожно взгляните на заходящее Солнце, а затем закройте глаза *). Последовательный образ состоит из нескольких маленьких

*) Goethe, Farbenlehre, I, 1, §§ 21—22; Titchener, Experimental Psychology, I, 1, 29; I, 2, 47.

кружков, и это доказывает, что глаз должен был двигаться небольшими толчками даже то короткое время, пока длился наш взгляд. Кружки поразят вас своими малыми размерами, потому что благодаря непомерной яркости Солнце кажется нам во много раз бóльшим, чем оно есть на самом деле; истинная его величина выявляется в последовательных образах.

Снова откройте глаза и вы увидите последовательные образы всюду, куда ни посмотрите. Чем дальше расположены предметы, на которые эти образы проектируются, тем больше кажутся сами образы. Конечно, угловой диаметр всегда остается неизменным, однако если вам известно, что один предмет расположен гораздо дальше другого, то будь они даже видимы под одинаковыми углами, вы, на основе повседневного опыта, подсознательно придете к заключению, что отдаленный предмет должен быть бóльшим по своим размерам.

На темном фоне последовательный образ будет светлым (позитивный последовательный образ). Это можно хорошо наблюдать, если закрыть глаза и заслонить их рукой (что необходимо, поскольку веки просвечивают). Наоборот, на светлом фоне последовательный образ становится темным (негативный последовательный образ). Очень сильный свет приводит, вероятно, к местному возбуждению сетчатки, и впечатление сохраняется, причем в то же время уменьшается чувствительность этого участка сетчатки к новым световым ощущениям.

«Я всматривался в большое красное Солнце,
Так внимательно и пристально, как мог.
И повсюду, куда я смотрел потом,
Я видел солнца бледные и блеклые,
Они танцевали из-за каждого предмета,
Делая темный, угрожающий круг;
Они прыгали по земле, стене и прямо в воздухе,
Это было целое шествие солнц.
Они исчезали из моих глаз, но оставались в моем сердце.
Последнее, что я увидел,
Было что-то черное, нависшее надо мною»

(Rene de Clercq, De Noodhoorn)

Источники света, более слабые, чем Солнце, дают соответственно более слабые последовательные образы. Возбуждение на сетчатке ослабевает тогда спустя несколько секунд или даже долей секунды, и остается только утомление, так что можно наблюдать лишь обратный последовательный образ на светлом фоне.

Рассказывают, что людям, смотревшим в продолжение получаса на оранжево-желтое пламя очага, поднимающаяся Луна казалась синей.

Вспышка молнии во время ночной грозы иногда позволяет наблюдать последовательный образ в виде тонкой черной змеевидной

линии на фоне освещенной белой стены или на фоне слабого рассеянного света неба *).

Если разглядывать горизонт, стоя в сумерки на берегу моря, непременно дождешься того момента, когда граница между светлым небом и темным морем перестает быть различимой. Это происходит благодаря тому, что чем дольше глаз возбуждается светом, тем слабее раздражающее действие последнего, так как сетчатка утомляется. Истинность этого заключения легко доказывается, если перевести взгляд чуть выше; негативный последовательный образ моря принимает форму светлой полосы на фоне неба. Если немного опустить взгляд, можно увидеть темный последовательный образ неба на фоне моря **).

При цветных источниках света переходу белого в черное соответствует переход последовательного образа в дополнительный цвет: красный переходит в сине-зеленый, оранжевый — в голубой, желтый — в фиолетовый, зеленый — в пурпуровый, и наоборот.

Сумерки — лучшее время для наблюдения последовательных образов; все типичные примеры этих образов, приведенные у Гете, отмечены в вечерние часы. Глаз в это время спокоен, а контраст между светом на западе и тенью на востоке достигает наибольшей остроты.

Гете в своей «Теории цветов» пишет: «Когда однажды вечером я зашел в гостиницу, ко мне подошла хорошенькая девушка. У нее было ослепительно белое лицо и черные волосы, она носила алый корсаж. В смутных сумерках я пристально смотрел на нее, пока она стояла в некотором отдалении. Когда, спустя мгновение, она отошла, я увидел на противоположной белой стене черное лицо, окруженное ярким сиянием, и ясно очерченную фигуру в платье великолепного цвета морской воды» ***).

## 102. Явление Елизаветы Линней

Елизавета Линней, дочь знаменитого ботаника, заметила однажды вечером какой-то свет, который излучали оранжевые цветы настурции (Tropaeolum majus). Предполагалось, что это электрическое явление. Оно наблюдалось Дарвином на цветах одного из видов южно-африканской лилии, а также Хаггреном, Дауденом и более ранними исследователями, причем все наблюдения относятся к сумеркам, на рассвете или на закате. Кенон Рассел повторил этот опыт с ноготками (Calendula officinalis) и с неопалимой купиной (Dictamnus fraxinella), отметив одновременно, что некоторые люди видят этот свет лучше других.

*) Nature 60, 341, 1905

**) Helmholtz, Physiologische Optik, 3-е изд., т. II, 202.

***) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 52.

И все-таки представляется, что это явление, которому в свое время было посвящено немало ученых трактатов, следует просто приписать последовательным образам! Гете видел последовательные образы, когда после пристального разглядывания ярко окрашенных цветов он переводил взор на песчаную дорожку. Пионы, восточные маки, ноготки и желтые крокусы давали, особенно в сумерки, красивые зеленые, голубые и фиолетовые последовательные образы, а сверкающие вспышки он видел, смотря в сторону. Именно этого и следует ожидать от последовательных образов.

Если вы хотите увидеть это явление ясно, поднесите к живым цветам ярко окрашенные бумажные и поглядите, получится ли нечто подобное и с ними.

## 103. Изменение цвета в последовательных образах

Быстрота исчезновения последовательного образа зависит от цвета, особенно при очень сильном световом воздействии. Поэтому последовательные образы Солнца и ярких белых предметов оказываются окрашенными. На темном фоне последовательный образ, как правило, сначала принимает сине-зеленую, а затем пурпурную окраску.

«К вечеру я зашел в кузницу, в тот момент, когда под молот положили раскаленный брусок железа. Некоторое время я пристально смотрел на него, а затем повернулся и случайно заглянул в открытый угольный сарай. Перед глазами у меня поплыло огромное пурпурное изображение, а когда я снова посмотрел на светлые бревна постройки, цвет стал наполовину зеленым, наполовину пурпурным, в зависимости от того, какой был фон, светлый или темный» *).

Если смотреть на сверкающий в лучах Солнца снег или читать залитую солнечным светом книгу, то все яркие близкие предметы кажутся пурпурными, а потом в тени все темные предметы приобретают красивый зеленый оттенок. Здесь также видимый на темном фоне последовательный образ на светлом фоне окрашивается в дополнительный цвет. Некоторые наблюдатели вместо пурпурного говорят о «кроваво-красном» цвете.

Когда мы идем в направлении заходящего Солнца, все темные места пейзажа кажутся залитыми красноватым сиянием, свет Солнца попадает в глаз не только через зрачок, частично свет проникает также сквозь веки и роговицу, становясь таким образом кроваво-красным. Наше поле зрения целиком заполнено этим общим красным освещением, и мы ясно различаем его всякий раз, когда окружающие предметы темны; черные буквы выглядят, например, красными.

---

*) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 54.

Если теперь встать в тень или зайти в комнату, наша сетчатка по отношению к красному цвету остается утомленной, и все яркие места кажутся зелеными.

У наблюдателя, который не принял особых мер предосторожности, окрашенные последовательные образы от белого света (поступившего сквозь зрачок) сочетаются с утомлением по отношению к красному свету (проникшему сквозь роговицу), и создается сложный эффект.

Черные буквы при вечернем освещении кажутся красными, вероятно, потому, что низкое Солнце светит в глаза читающему.

## 104. Контраст, получаемый при «одновременном сравнении»

Возьмите лист чистой белой бумаги для рисования и, держа его вертикально перед собой, встаньте у окна, не освещенного Солнцем. Смотрите не в окно, а параллельно с ним.

Бумага в таком положении будет хорошо освещена и будет достаточно яркой. Пододвиньте бумагу ближе с тем, чтобы частично заслонить ею ясное небо на горизонте; вы увидите, что бумага сразу же станет черной! Ясно, что в таком положении бумага должна быть освещена не хуже, ибо она находится еще ближе к стеклу. Изменился только фон, на котором вы проводите опыт с бумагой. При первом опыте я брал фон темным, и бумага казалась светлее из-за контраста. При втором опыте, когда фон был более светлым, бумага кажется темной.

Подобные явления контрастности играют большую роль при всевозможных наблюдениях над природой.

## 105. Контрастная кайма на стыке различных яркостей (фотография XI)

Очертания темного ряда домов на фоне более светлого неба кажутся, особенно по вечерам, обведенными световой каймой. Это можно объяснить, допустив, что глаз невольно совершает слабые движения, и яркие последовательные образы домов покрывают и «высветляют» окружающую часть неба. Однако этим эффект объясняется лишь частично; гораздо большее значение имеет ослабление чувствительности того участка сетчатки, который окружает освещенное поле (§ 90).

«Однажды, сидя на лугу, я разговаривал с человеком, стоявшим немного поодаль; фигура его вырисовывалась на сером небе. Некоторое время я смотрел на него пристально и не отрываясь, а затем чуть отвел взгляд и увидел его голову, окруженную ослепительным сиянием» *).

*) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 30.

Патер Беккариа, проводя опыты с воздушным змеем, заметил небольшое световое облако, окружавшее змей и привязанную к нему веревку. Если змей начинал двигаться быстрее, облако, казалось, отставало, и мгновение колыхалось взад и вперед *).

Поразительным примером оптического контраста могут служить холмистые равнины: благодаря воздушной перспективе волнистые гребни с расстоянием становятся все светлее и светлее и, наконец, теряются в туманной дали (фотография XII). Каждый гребень кажется вдоль вершины темнее, чем вдоль подножья, причем эффект настолько убедителен, что его нельзя не заметить. И все же это лишь обман зрения, возникающий вследствие того, что каждый гребень окаймлен по вершине более светлой, а у подножья — более темной полосой. Для доказательства требуется лишь кусок бумаги (пунктир на фотографии XII), заслоняющий верхнюю часть пейзажа; этого достаточно, чтобы эффект контрастности пропал.

## 106. Контрастная кайма вдоль границ тени **)

Известно, что кусок картона, выставленный на Солнце, отбрасывает на экран тень, а между нею и светлым полем существует полутень, обусловленная конечными размерами солнечного диска (§ 2). Но все ли знают, что эта полутень обладает яркой каймой у перехода от света к полутени?

При низком и потому не слишком ярком Солнце поместим экран примерно в 4 *м* позади куска картона и будем слегка покачивать его, чтобы сгладить отдельные неровности. Эффект виден очень четко. Наблюдаемое распределение света показано сплошной линией на рис. 103.

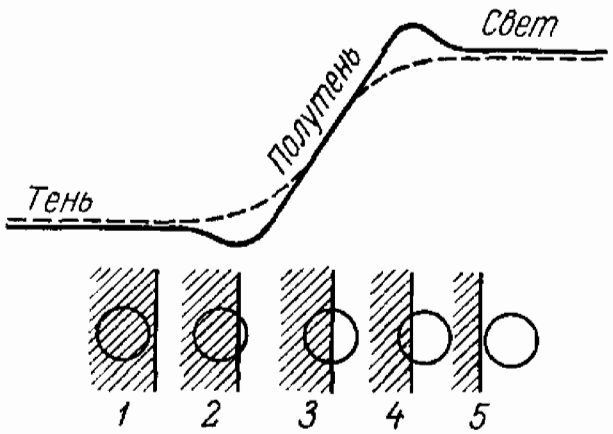



Рис. 103. Контрастная кайма вдоль границы тени. Сплошная линия — кажущееся распределение яркости, пунктир — действительное.

Понятно ли вам, в чем дело? Ожидаемое распределение света можно вывести из следующих соображений.

В последовательных точках освещенного экрана *1, 2, 3* солнечный диск оказывается закрытым куском картона все меньше и меньше. Яркость этих точек пропорциональна все увеличивающейся незакрытой части диска и должна поэтому следовать пунктирной кривой на рис. 103. Таким образом, здесь вообще не может быть светлой каймы; весь эффект должен возникать вследствие оптической иллюзии.

*) Goethe, Farbenlehre, 1, 1, § 30.

**) K. Groes-Pettersen, Astr. Nachr. **196**, 293, 1913.

И действительно, все обстоятельства склоняют нас к такому выводу. Мах показал, что контрастные полосы обязательно становятся видимыми, если яркость изменяется неравномерно, т. е. выражается на диаграмме кривой линией. Эти полосы всегда как бы преувеличивают кривизну. Легко понять, что это действительно так, поскольку мы допускаем либо постоянные слабые движения глаза, либо ослабление чувствительности сетчатки по соседству с освещенными участками.

Указанные в § 105 примеры также всецело согласуются с теорией Маха; нужно лишь относить излом кривой яркости за счет преувеличения кривизны.

Время от времени появляется особая возможность проверить эту теорию, а именно — частное затмение Солнца. В этом случае при повторении опыта можно получить разнообразные необычные варианты распределения света вдоль края полутени, сообразно с покрытием Солнца Луной и с перемещением отбрасывающего тень картона. Каждый из этих вариантов дает свои видимые контрастные полосы, удовлетворяющие во всех случаях закону Маха. Не приходится удивляться, если тени выглядят настолько необычно, что возбуждают интерес даже у случайных наблюдателей (ср. § 3).

## 107. Черный снег

Приглядитесь к снежным хлопьям, медленно падающим с серого неба. На фоне неба эти хлопья определенно кажутся темными. Следует помнить, что белое, серое и черное различаются только по яркости, а ее мерой служит окружающий фон. В данном случае все яркости мы относим к яркости неба, которое много ярче, чем можно было бы подумать, и всегда ярче, нежели наблюдаемые снизу снежные хлопья. Об этом явлении упоминает Аристотель.

## 108. Белый снег и серое небо *)

Ровное серое небо кажется гораздо темнее покрытой снегом Земли. И все же мы явно заблуждаемся, потому что именно это небо освещает Землю, а освещаемый предмет никогда не может обладать большей поверхностной яркостью, чем источник света. Бóльшая яркость неба неопровержимо подтверждается при помощи фотометра. Если взять маленькое зеркало и расположить его так, что изображение неба будет видно рядом с изображением снега, можно заметить, что по сравнению с белым небом снег действительно серого цвета. Непременно проделайте этот опыт: его результаты столь же убедительны, сколь и неожиданны!

---

*) J. Optic. Soc. Amer. **11**, 133, 1925.

И все-таки иллюзия контраста не уничтожается, хотя мы знаем, что в действительности дело обстоит наоборот. Решающим является здесь контраст между снегом и гораздо более темными лесами, кустами или строениями.

Точно так же в пасмурный день белая стена может показаться ярче неба. Фотографии и картины, не согласующиеся с этой иллюзией, производят впечатление неестественных.

## 109. Цветовой контраст

Во многих случаях, когда вокруг нас преобладает какой-либо один определенный цвет, дополнительный цвет кажется подчеркнутым резче. Иногда это можно объяснить так же, как контрастную кайму, а именно — невольными движениями, которые постоянно совершает наш глаз. Однако гораздо более важную роль играет здесь то, что участки сетчатки, возбужденные преобладающим цветом, ослабляют чувствительность соседних участков к этому цвету. Получается так, как если бы наш глаз стал чувствительнее к дополнительному цвету, который в результате производит впечатление большей свежести и насыщенности. В этом аспекте цветовой контраст можно рассматривать как еще один пример общего закона, согласно которому цвет и яркость поддаются оценке только по отношению ко всему комплексу изображений, возникших на сетчатке.

Отмечалось, что на дворе, мощенном серым известняком, пробившаяся между плитами трава приобретала изумительно красивый зеленый цвет, когда вечерние облака отбрасывали на плиты едва различимый красноватый отблеск *).

Если идти лугом при относительно ясном небе, то со всех сторон преобладает зеленый цвет, и стволы деревьев и тропинки кажутся красноватыми. Серое здание кажется красноватым, если смотреть сквозь зеленую штору. Морские волны окрашены в великолепный зеленый цвет, и теневые участки кажутся пурпурными (ср. § 234—236) **).

В очень редких случаях планеты проходят очень близко к ярким звездам. Однажды белая звезда $\alpha$ Девы рядом с оранжево-красным Марсом казалась голубовато-стальной.

При керосиновой лампе или при свечах, дающих красноватый оттенок, свет Луны или дуговых ламп представляется зеленовато-синим. Этот контраст особенно нагляден, если источники света не слишком сильны, например, если одновременно наблюдать в воде отражения Луны и пламени газа.

---

*) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 59.
**) Там же, § 57.

«Казалось, что и голубые лучи Луны светились каким-то неземным глянцем над пламенем пожаров и войны» (Д. Мережковский, Леонардо, X, гл. 8).

Люди, которым пришлось хотя бы в течение получаса смотреть на оранжевое пламя пожара, видели, что Луна приобретала голубой оттенок. Если вечером погулять хотя бы в течение 10 минут с голубым затемненным фонарем, то небо и стены домов будут казаться нам оранжево-красными. Полосы на Земле от солнечных лучей, проникших сквозь зеленую лесную листву, кажутся нам чуть розовыми по сравнению с общим зеленым фоном леса *).

Леонардо да Винчи отмечал, что «черные одежды заставляют тело на изображении человека казаться белее, чем в действительности, белые одежды заставляют тело казаться темным, желтые одежды заставляют его казаться цветным, а в красных одеждах оно кажется бледным».

Цветовой контраст исчезает при большом различии яркостей. Это можно отчетливо наблюдать вечером, в сумерки, когда темные ряды домов вырисовываются на фоне ярко-оранжевого западного неба. На расстоянии видны лишь однотонные темные силуэты; все детали и различия в яркости пропадают. Так же очерчены ветки и листва деревьев; они похожи на темный бархат, собственные их цвета исчезли (ср. § 246). Этот факт нельзя приписать тому, что само по себе освещение является слишком слабым, поскольку в то же время цвет любых предметов на Земле различается ясно.

После прогулки по снегу, в продолжение которой нас несколько часов окружало только белое и серое, все другие цвета кажутся нам особенно насыщенными и теплыми. Наши глаза «отдохнули от цвета».

«Впрочем, эти явления встречаются наблюдателю повсюду и вызывают даже раздражение»,— говорит Гете в «Теории цветов».

## 110. Цветные тени

Если карандаш, поставленный стоймя на лист бумаги, с одной стороны освещен свечой, а с другой — Луной, то тени поразительно различны по цвету: первая приобретает синеватый оттенок, вторая — желтоватый **).

Здесь на самом деле имеется физическое различие в цвете, потому что в месте падения первой тени бумага освещена только Луной, а в месте падения второй — только свечой. Хотя лунный свет белее света свечи, но во всяком случае не является синим. Поэтому действительное различие в цвете двух теней,

*) H. Helmholtz, Optisches über Malerei, 125.
**) Goethe, Farbenlehre, I, 1, § 75.

очевидно, подчеркивается и видоизменяется *физиологическим контрастом*.

Подобным же образом мы можем ночью подметить различие в цвете двух наших теней, одна из которых отбрасывается Луной, а другая — уличным фонарем.

Насколько относителен «оранжевый» цвет электрических фонарей в сравнении со светом современных натриевых ламп, можно очень хорошо убедиться там, где свет тех и других смешивается. Тень от натриевой лампы великолепного синего цвета, тень от фонаря — оранжевого! Если вас освещает только натриевая лампа, тень кажется черной, однако стоит приблизиться к обыкновенной электрической лампочке, как эта тень внезапно становится синей, и наоборот, черная тень от электрического света вдруг превращается в оранжевую, когда мы подходим к натриевой лампе. Очевидно, глаз приспосабливается к среде и склонен принимать преобладающий цвет за белый, а все другие цвета оцениваются по отношению к этому белому.

Гете замечает, что тени светло-желтых предметов — фиолетового цвета. С физической точки зрения это, без сомнения, неправильно, однако благодаря физиологическому контрасту так может получиться, например, в том случае, когда предмет повернут к наблюдателю освещенной стороной, и для этого наблюдателя тень предмета накладывается на ярко-желтый фон.

Может возникнуть вопрос, почему тени, отбрасываемые в разгаре дня Солнцем, практически неокрашены, хотя голубизна неба очень сильно отличается от цвета солнечных лучей. Суть в том, что слишком велико различие яркостей тени и света. Однако если так наклонить экран, на который отбрасывается тень, чтобы солнечные лучи проходили почти по касательной к нему, то цветовой контраст будет выражен гораздо лучше.

Классический пример — тени на снегу. Чистота их цветов особенно наглядна. Эти тени — синие, так как они получают только свет синего неба; их синева почти равняется синеве самого неба. А поскольку мы видим их рядом со снегом в желтоватом свете Солнца, они должны казаться еще более синими. Однако вследствие большого различия в яркости их цвет не так отчетлив, как можно было бы ожидать. Понаблюдаем за этими тенями на заходе Солнца, особенно в последние минуты перед тем, как оно скроется. По мере того, как Солнце становится оранжевым, а потом красным и пурпурным, тени делаются голубыми, зелеными и зелено-желтыми. Оттенки выражены так отчетливо потому, что в это время различие в яркостях тени и окружающего снега гораздо меньше, чем днем. Лучи Солнца падают на снег под очень малым углом, и поэтому рассеянный свет неба играет относительно бо́льшую роль. Кроме того, цвета Солнца делаются все более и более насыщенными.

«Путешествуя зимой по Гарцу, я спускался в сумерки с Брокена. Надо мной и подо мной поля были белы от снега и степь была покрыта снегом; одинокие деревья и выступающие утесы, купы деревьев и массивы скал — все было густо одето инеем; Солнце садилось за Одерские озера. Днем, когда снег был лишь слегка тронут желтым, тени казались бледно-фиолетовыми, но теперь, когда освещенные участки отливали густой желтизной, тени определенно стали ярко-синими. А когда Солнце вот-вот должно было зайти, и его лучи, смягченные воздухом, окрасили все вокруг в великолепный пурпурный цвет, тени приобрели зеленый оттенок, который по чистоте тона мог соперничать с цветом морской волны, а по красоте — с изумрудом. Чудесное видение оживало, мир стал сказочным, все было озарено этими двумя яркими и изумительно сочетающимися цветами, пока Солнце, наконец, не зашло, и прекрасное зрелище не сменилось серыми сумерками, а затем ясной ночью с Луною и звездами» *).

Цветные тени на снегу, как это ни странно, явление до некоторой степени психологическое **). Днем при голубом небе тени кажутся еще более синими, если только не сознавать, что это снег. Теневое пятно на снегу можно в отдалении принять и за «белый снег в тени» и за «голубое озеро». Равным образом, синие снежные тени кажутся еще синее на матовом стекле фотоаппарата, так что сразу их даже и не узнать! Наблюдатель, смотрящий из густого хвойного леса на отдаленный кустарник, покрытый инеем, на самом деле беспристрастен, утверждая, что иней кажется ему синим; условия такие же, как если бы он смотрел сквозь трубку (§ 192).

Психологам хорошо известно, что цвета можно привести к их естественному тону, если смотреть сквозь малое отверстие. Цвета кажутся тогда лежащими в плоскости этого отверстия. Однако в тот момент, когда мы представляем себе предмет в его естественном окружении и при обычном освещении, влияние окраски автоматически компенсируется, и один и тот же предмет кажется нам до удивления одинаковым даже при изменяющихся условиях.

Весьма любопытное описание этого явления, увиденного глазами детей, т. е. непредупрежденных наблюдателей, дано в советской литературе. Я ни на минуту не сомневаюсь, что это описание взято из жизни, хотя некоторые детали, несомненно, опущены автором, писавшим по памяти: по крайней мере часть неба должна была оставаться голубой, когда снег падал, а Солнца не было видно:

« — Галя, смотр-ри!.. Зачем плавает снег голубой... смотри!!. голубое, голубое!..

---

*) Goethe, Farbenlehre, I, 1, 75.
**) I. G. Priest, J. Optic. Soc. Amer. **13**, 308, 1926.

Детишки заволновались и стали радостно перекликаться в восторге:

— Голубое! голубое! . плывет голубое!..

— Что — голубое? Где?

Я осмотрелась вокруг, поглядела в снежные поля, в снежные изгорья и тоже взволновалась. Было необыкновенно: снег действительно кружился и плыл на нас со всех сторон — и близко и далеко,— голубыми волнами. А дети кричали в радостном возбуждении.

— Это просыпалось небо? Да, Галя?

— Голубое, голубое!..

И я опять поразилась поэтической наблюдательностью этих крошек. Я вот шла с ними и не заметила этой плывущей голубизны, я прожила много зим, много раз переживала наслаждение от снегопадов, а вот ни разу не замечала этого необъятного лазурного круговращения снега на земле» *).

## 111. Цветные тени, возникающие от окрашенных отражений

Освещенные Солнцем цветные предметы часто отбрасывают столько света, что возникают тени, окрашенные в дополнительный цвет. Маленькая записная книжка служит идеальным инструментом для наблюдения этих световых эффектов. Раскройте ее под прямым углом, тогда одна сторона ее будет задерживать свет от неба или солнечные лучи, а другая — улавливать цветное отражение. Если поставить перед бумагой карандаш, тень его принимает дополнительный цвет и является поэтому чрезвычайно чувствительным показателем окраски падающего света. Окрашенная в зеленый цвет стена или зеленый кустарник отбрасывают розовые тени; желтая стена дает голубые тени (однажды они простирались на целых четыреста метров), такая же тень наблюдалась от склона горы, имевшего цвет охры **).

## 112. Контрастный треугольник

По словам одного наблюдателя ***), ясной ночью он видел со своего корабля Луну, находившуюся в 20° над горизонтом, которая отражалась в волнах в форме светлого треугольника, протяжением от корабля до горизонта (рис. 104). Самое замечательное однако то, что от Луны к горизонту он видел такой же, но темный и повернутый книзу треугольник. Казалось несомненным, что эффект был физиологиче-

---

*) Ф В Гладков, «Новая земля», М.—Л , 1931, стр 155—156.

**) C R Paris **48**, 1105, 1859

***) Cl. Martins, C R Paris **43**, 763, 1856.

ским и по многим причинам неистинным Он наблюдался также в тех случаях, когда береговые горы достигали примерно той же высоты, что и Луна, и исчезал, если нижний световой треугольник или Луна оказывались затенены Если наблюдатель отворачивался, а затем снова принимался смотреть, то иллюзия возобновлялась

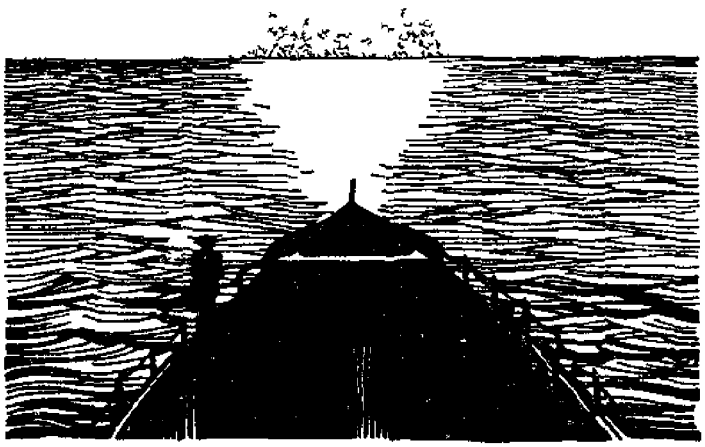


Рис. 104. Контрастный треугольник.

лишь спустя несколько секунд. Эта история казалась мне настолько недостоверной, что я вычеркнул ее при подготовке второго издания этой книги. Однако неожиданно я получил описание подобного явления, наблюдавшегося около Осло и несколько позже — в Голландии. Мы нашли его на картинах и афишах, оно было воспроизведено в лаборатории Было установлено, что явление возникает, если небо над горизонтом слабо освещено, например, из-за легкой дымки.

# СУЖДЕНИЯ О ФОРМЕ И ДВИЖЕНИИ

## 113. Оптические иллюзии, связанные с определением положения и направления *)

Предположим, что в поле зрения мы можем различить две группы объектов. Внутри каждой группы объекты расположены или параллельно или перпендикулярно друг к другу; в то же время обе группы наклонены одна относительно другой. В этом случае одна группа покажется «преобладающей», и мы будем склонны рассматривать ее как истинный эталон для определения горизонтальных и вертикальных направлений.

Если случается так, что поезд останавливается или замедляет ход на повороте и вагон вследствие этого наклоняется, то все столбы, дома и башни представляются мне опрокинутыми в противоположную сторону. Я хорошо сознаю наклонное положение моего вагона, но лишь до определенной степени.

Если в коридоре кренящегося под ветром корабля мне встречается человек, то он кажется отклоненным от вертикали. Если мы спускаемся по склону горы, то горизонт нам кажется слишком высоким.

«Вдоль крутого склона плыли мы к Голландии. Море на западе слегка волновалось и поднималось так высоко, как будто грозило наводнением» (Письма А. Тернерса, 1827 г.).

Нечто подобное ощущает велосипедист, оценивая небольшие уклоны дороги **). Та часть дороги, по которой он едет, будет неизменно казаться ему слишком горизонтальной, при спуске с крутого холма полоса воды сбоку от дороги не производит впечатления горизонтальной, но как бы приподнимается навстречу велосипедисту. На легком уклоне ему кажется, что дорога идет дальше вверх, хотя в действительности она остается ровной; подъем вдали представляется слишком крутым, напротив — длинный спуск слишком пологим. Глаз отмечает преимущественно, как *меняется* передо мной наклон дороги, и зрительные впечатления часто расходятся с теми, которые я испытываю, нажимая на педали.

*) Luckiesh, Optical Illusions, New York, 1922
**) Bragg, The Universe of Light, London, 1933, p 66.

Проезжая как-то на велосипеде вдоль высоколежащей дороги, что проходит немного севернее Аркнема, я рассматривал простиравшуюся передо мной в южном направлении долину, где находятся кирпичные заводы с их высокими трубами. Хотя я знал, что они стоят в низине лугов, раскинутых вдоль Рейна, у меня складывалось неопровержимое впечатление, что они находятся на вершине гребня холма на гораздо большей высоте, чем равнина.

Подобные зрительные восприятия усиливаются, если им помогает чувство равновесия и напряжение мышечной системы. Когда самолет идет на посадку, пассажиры видят пейзаж наклоненным по отношению к кабине. Одновременно они чувствуют силу тяжести, которая складывается с центробежной силой. Зрительное впечатление от этого становится еще более убедительным.

Если поезд делает поворот на полном ходу, то мы видим, как все вертикальные предметы в пейзаже как бы наклоняются; здесь играет роль зрительное впечатление и мышечное ощущение Если поезд вдруг остановится, находясь в таком положении, или начнет идти медленнее, то часть эффекта сразу же исчезает.

Любопытную иллюзию можно наблюдать в поезде в момент торможения. Обратите внимание на трубы, дома, оконные рамы или любые другие вертикальные предметы. В момент, когда поезд явственно замедляет ход, у вас создается впечатление, что все эти вертикальные линии качнулись вперед, причем отчетливее всего — как раз перед полной остановкой поезда. Сразу после этого они снова становятся прямо. При этих условиях даже горизонтальный луг казался наклонившимся и затем возвращался в обычное положение.

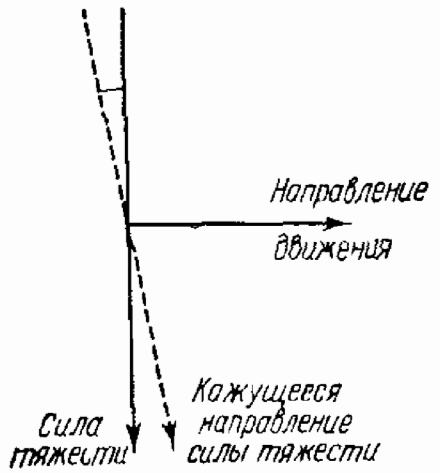



Рис 105. Кажущееся изменение в направлении силы тяжести при замедлении хода поезда.

Объяснение состоит в том, что при торможении мы чувствуем легкий наклон вперед, как если бы изменилось направление силы тяжести. Соответственно мускульному ощущению этой новой «вертикали», окружающие предметы также качнутся вперед (рис. 105).

## 114. Как мы видим движения

Люди обычно считают, что движение становится заметным, когда мы наблюдаем изменение в положении предмета относительно неподвижной точки. Это, однако, не во всех случаях верно: скорость можно наблюдать просто как ощущение, подобно протяженности

или времени. Глядя на движущиеся облака, вы сразу же получаете представление об их направлении и скорости.

Установлено, что мы замечаем скорости уже в 1—2 минуты дуги в секунду, но только если в поле зрения есть неподвижные точки (хотя мы можем и не сознавать, что связываем движение с ними). Если таких точек нет, наблюдения скорости становятся менее определенными раз в десять. В этом случае неподвижной системой сравнения служит наш глаз. Глазные мускулы сигнализируют нам, что глаз покоится, и мы «видим», как изображения перемещаются по сетчатке относительно этой мускульной рамки.

Глядя на проходящие облака, постарайтесь в первый же момент наблюдения установить, в каком направлении они движутся. Варьируйте условия: низкие и высокие облака, легкий и сильный ветер, при Луне и без нее. При скорости 2′ в секунду край облака за 15 секунд пересечет весь лунный диск.

Если смотреть на вывешенную для сушки сеть с крупными ячейками, можно ясно видеть каждое дуновение ветра, однако стоит фиксировать взгляд на одной из ячеек, как движение воздуха вообще станет почти незаметным. По-видимому, глаз очень чувствителен к комплексу малых взаимосвязанных движений. Это можно наблюдать на стене, заросшей диким виноградом, по которому пробегает ветер.

## 115. Движущиеся звезды*)

В 1850 г. или около этого времени большое внимание привлекло к себе таинственное явление: если пристально смотреть на звезду, то иногда кажется, будто она покачивается и меняет свое положение. Было установлено, что это наблюдается только в сумерки и только для звезд, расположенных менее чем в 10° над горизонтом. Яркие мерцающие звезды двигаются сначала маленькими толчками параллельно горизонту, затем на 5—6 секунд останавливаются и начинают двигаться назад таким же образом. Многие наблюдатели видели это так отчетливо, что принимали за объективно существующее явление и пытались объяснить наличием теплых воздушных потоков **).

Однако какое-либо реальное физическое явление здесь полностью исключается. Реальное движение в 1/2° в секунду, видимое невооруженным глазом, легко увеличивается при помощи телескопа средней силы до 50° и больше; это означает, что звезды мелькали бы взад и вперед в поле зрения как метеоры. Каждый астроном знает, что это чистая бессмыслица. Даже при самых больших ат-

*) Pogg. Ann. **92**, 655, 1857. Первые наблюдения — см. A. Humboldt, Kosmos, III, 75. Более позднюю литературу, относящуюся к автокинетическим зрительным представлениям, см. Handbuch d. Phys. **20**, Physiologische Optik, S. 174.

**) A. Müller, Pogg. Ann. **106**, 289, 1859.

мосферных волнениях смещения, вызванные мерцанием, остаются ниже пределов, воспринимаемых простым глазом. Однако с т о ч к и з р е н и я п с и х о л о г и и явление не потеряло своей значимости. Оно может быть обусловлено отсутствием объектов, по отношению к которым легко определить положение звезды. Мы не отдаем себе отчета в том, что наш глаз постоянно бессознательно совершает небольшие движения, а потому, естественно, приписываем смещение изображения на сетчатке соответствующему смещению источника света.

Заметить это явление относительно легко. Для этого нужно лишь удобно сесть вечером на открытом воздухе и внимательно наблюдать за одной из первых звезд, появляющихся на небе. Я лично вижу медленные колебания туда и обратно примерно в 1/2°; некоторые наблюдатели видят более сильные колебания.

Однажды кто-то спросил меня, почему, если пристально следить за очень далеким самолетом, то всегда кажется, будто он передвигается небольшими толчками. Здесь, очевидно, играет роль та же психологическая причина, что и в случае с «движущимися» звездами; «очень далекий» указывает, по-видимому, на то, что явление скорее всего наблюдалось тоже близ горизонта.

А каким образом сможем мы объяснить тот факт, что три человека неожиданно и одновременно увидели, как Луна «плясала», двигаясь вверх и вниз, и это продолжалось около 30 минут *)?

## 116. Вращающийся пейзаж и сопровождающая нас Луна

*Неспешное движение поезда заставляло этот городок медленно кружиться: казалось, что все его необыкновенные постройки вращаются вокруг невидимой точки...*

*(Г о р ь к и й, Жизнь Клима Самгина, т. 1, гл. 5)*

Обратим внимание на два дерева или два дома, расположенные от нас на неодинаковом расстоянии. Как только мы сдвигаемся с места, обнаруживается, что дальний предмет двигается вместе с нами, а ближний остается позади. Это — простейший пример параллакса.

Вращение пейзажа было одним из первых впечатлений, еще ребенком поразивших меня на железной дороге. Допустим, что я смотрю направо; тогда каждый близкий к поезду предмет тоже уносится направо, а каждый удаленный движется вместе со мной налево. Кажется, что вся картина поворачивается вокруг воображаемой точки — той, куда мне случится посмотреть. Независимо от того, гляжу ли я на близкий или на далекий предмет, все предме-

*) Nature 38, 102, 1888.

ты, расположенные за ней, движутся вместе со мной, а расположенные перед ней — остаются позади. Попробуйте сами проделать этот опыт. Ясно, что эти зрительные представления возникают вследствие параллакса; новым является то, что мы связываем все с точкой, в которую устремлен наш взгляд. Такова психологическая особенность наших зрительных наблюдений. Идем ли мы пешком, едем ли на велосипеде или поездом,— мы всегда видим верную Луну, которая в отдалении сопровождает нас. То же самое происходит с Солнцем и звездами; мы только не привыкли это замечать. Все это свидетельствует о том, что наше внимание обращено на пейзаж, и поэтому благодаря параллаксу кажется, будто небесные тела движутся вместе с нами относительно пейзажа.

## 117. Иллюзии, относящиеся к покою и движению

*Посмотри сквозь перила моста, и ты увидишь, как мост плывет по неподвижной воде.*

*(Китайское изречение)*

*Как Гаризенда, если стать под свес,*
*Вершину словно клонит понемногу*
*Навстречу туче в высоте небес...*

*(Данте, Ад, песнь XXXI)*

Вам хорошо знакома иллюзия, возникающая, когда из окна стоящего вагона вы видите, как трогается в путь соседний поезд. На мгновение кажется, будто это ваш собственный поезд медленно отправляется со станции. Если смотреть некоторое время на бегущие над высокой башней облака, кажется, что облака стоят на месте, а башня движется. Точно так же можно видеть, как Луна мчится над неподвижными массами облаков. Переправляясь через ручей по узкой доске, будьте осторожны! Чтобы избежать головокружения, не смотрите на текущую воду: наше представление о покое и движении здесь нарушается из-за того, что необычно большая часть нашего поля зрения оказывается движущейся. Во время первого морского путешествия вы видите, как висящие в каюте вещи раскачиваются взад и вперед, а сама каюта остается в покое *).

Во всех этих случаях иллюзия тесно связана с описанной в § 113. Более глубокие психологические исследования показали, что мы склонны считать движущимися те предметы, которые, как нам известно из опыта, обычно являются движущимися элементами пейзажа. Помимо того, здесь действует другой весьма важный и более общий закон: мы автоматически связываем представление о

*) H. Helmholtz, Physiol. Optik, 3-е изд., III, 209; J. J. Oppel, Pogg. Ann. **99**, 540, 1856.

покое с более обширным пространством, с элементами, обрамляющими поле зрения, в то время как движение автоматически связывается с элементами, находящимися внутри этой рамки. В ряде упомянутых выше случаев этот второй закон сталкивается с первым, и, как показывают иллюзии, берет верх над нашим обычным, будничным опытом.

Я сижу у окна железнодорожного вагона, мечтательно глядя на убегающую землю. Когда поезд уже остановился, и я твердо убежден, что он стоит на месте, я все же продолжаю испытывать неустранимое ощущение, как будто земля медленно уходит вперед. Это ощущение не достигает, однако, такой силы, чтобы заставить все поле зрения перемещаться с одной и той же скоростью. Ближе ко мне движение кажется быстрее, немного поодаль — медленнее; несколько правее или левее точки, на которую я смотрю, движение также представляется мне более медленным. Кажется, будто весь пейзаж медленно вращается вокруг этой точки, растягиваясь и сокращаясь при вращении подобно эластичному веществу. Это вращение происходит в направлении, обратном наблюдавшемуся при движении поезда (§ 116). Интересно было бы быстро пересесть к противоположному окну в момент остановки поезда; вращение тогда должно происходить в прежнем направлении.

Можно предположить, что мускулы глаза привыкли бессознательно следовать за мчащимися мимо предметами, и когда поезд останавливается, эти невольные движения не прекращаются сразу, так что некоторое время мы, так сказать, добавляем к действительным скоростям постоянную «компенсирующую скорость». Однако посредством одного лишь движения глаза невозможно объяснить даже того, почему к границам поля зрения скорость изменяется именно так, как описано, а не как-либо иначе.

Были проведены опыты, состоявшие в том, что наблюдатель некоторое время смотрел на небольшие предметы, непрерывно двигавшиеся от некоторой центральной точки во всех направлениях. Когда движение прекращалось, казалось, будто световые точки стягиваются со всех сторон обратно к центру. Вероятно, это нельзя объяснить одним только движением глаза. Похоже более на то, что наше «сознание», наученное приводить скорость к определенной величине в каждом участке поля зрения, продолжает эту работу и после того, как движение прекратилось.

Когда мы безотрывно смотрим на маленькое пятнышко в окне вагона, устраняя таким путем движение глаза, описанное выше явление все равно возникает, при том, конечно, условии, что скорость поезда не настолько велика, чтобы внешние предметы сливались в сплошные полосы *).

---

*) Von Kries und Helmholtz, 3-е изд., III, 207.

С другой стороны, старое наблюдение Брюстера *) весьма определенно указывает на непроизвольные движения глаза. Видимые из окна поезда мелкие камешки вытягивались близ дороги в короткие полоски, но если взгляд быстро переводили чуть дальше, эти камешки на мгновение казались неподвижными, как бы освещенными электрической вспышкой. Это, по моему мнению, окончательно доказывает, что наш глаз на самом деле следует за движущимся предметом, хотя и не с той же точно скоростью.

Брюстер сделал еще и другое наблюдение. Глядя на проносящиеся мимо камни сквозь узкую щель в листе бумаги, он заметил, что если внезапно отвести глаза, продолжая смотреть сквозь щель, так что изображение камней приходится на боковое поле зрения,— на мгновение все становится совершенно отчетливым. Объяснению поможет § 99.

Обходя слева площадку для игр, обнесенную очень длинной оградой, я поворачиваю голову вправо и гляжу на детей. Спустя одну-две минуты я снова смотрю прямо перед собой и вижу, как камни на дороге и другие расположенные впереди предметы перемещаются справа налево. Когда я пытаюсь повторить опыт, глядя все время не на детей, а на изгородь, эффект проявляется гораздо слабее. Проводя такого рода наблюдения, вы обычно замечаете, что не нужно следить за самими движущимися предметами, а лучше смотреть на какой-нибудь нейтральный фон, в то время как сетчатку пересекают изображения с резкими контрастами светлого и темного **).

Я наблюдаю за падением снежных хлопьев. Проследив, как падает одна из снежинок, я быстро поднимаю глаза и выбираю другую и так в продолжение нескольких минут. Если я посмотрю теперь на покрытую снегом Землю, то она буквально приподнимается, а я испытываю такое ощущение, как если бы я опускался.

Поглядите несколько минут на поверхность быстро текущей реки или на плывущие по течению льдины, не выпуская из виду все это время, например, верхушку причального столба или какую-нибудь точку на острове. Если снова посмотреть теперь на твердую землю, то вы увидите, что она движется против течения. После того как вы некоторое время любовались водопадом, вам кажется, что его берега уходят вверх. В другом случае я пристально смотрел на высокий и узкий водопад и задержал взгляд на ровном склоне соседней горы. Мне показалось, что узкая вертикальная полоса скользит вверх. У Пуркинье, который из окна смотрел на процессию всадников, создалось впечатление, будто дома, расположенные вдоль дороги, движутся в противоположном направлении. Когда

---

*) Proc. Brit. Ass., 1848, p. 47.

**) B a s l e r, Pflüger's Archiv 132, 131, 1910.

вы идете полем по узкой тропке и смотрите на далекую Луну, условия окажутся очень благоприятными для возникновения этой иллюзии.

Коротко говоря, эти условия таковы: а) движение должно продолжаться по крайней мере минуту; б) оно не должно быть слишком быстрым; в) глаз должен быть безотрывно направлен на движущийся или неподвижный предмет и всегда таким образом, чтобы изображения, проходящие по сетчатке, были контрастны и отчетливы в деталях.

## 118. Качающиеся двойные звезды

Это явление наблюдал знаменитый В. Гершель. Посмотрите сквозь обыкновенный театральный бинокль на предпоследнюю звезду в «ручке» Большой Медведицы. Вы ясно увидите слабую звезду рядом с яркой (рис. 71, 88). Желательно провести опыт, когда слабая звезда расположена более или менее под яркой (хотя вы можете также добиться удачи и при другом положении звезд). Плавно передвигайте бинокль сначала немного влево, затем вправо, затем опять влево и т. д., с такой быстротой, чтобы изображения звезд превратились в маленькие светлые пятнышки. Тогда будет казаться, что слабая звезда каждый раз немного отстает от яркой, как будто привязана к ней веревкой, и что эта звезда качается (рис. 106).

Рис. 106. Двойные звезды кажутся качающимися, если наблюдать их в театральный бинокль, который сдвигается вправо и влево.

Объяснение заключается в том, что свету требуется некоторое время для того, чтобы возбудить сетчатку, и чем ярче звезда, тем короче это время. За тот период, пока мы определяем местоположение слабой звезды, яркая успевает передвинуться немного дальше.

Это явление недавно использовано Пульфрихом в конструкции нового типа фотометра.

## 119. Оптические иллюзии, относящиеся к направлению вращения *)

Глядя в сумерки на силуэт ветряной мельницы под некоторым углом к плоскости ее вращающихся крыльев (рис. 107, *а*), мы не можем различить, вращаются ли они по часовой стрелке или против нее (рис. 107, *б*). Чтобы заменить одно направление вращения на другое, необходимо на мгновение сконцентрировать внимание; однако обычно достаточно бывает спокойно продолжать наблюдения, пока не начнет казаться, что вращение изменилось само по себе.

*) Hemel en Dampkring **29**, 348, 380, 413, 1931.

Многие метеорологические станции оснащены анемометром Робинзона, т. е. маленькой ветряной мельницей с вертикальной осью вращения. Когда издали я смотрю на ее вращающиеся крылья, мне, без какого-либо сознательного усилия с моей стороны, кажется, будто они каждые 25—30 секунд меняют направление вращения. Точно так же и вертящийся флюгер может ввести нас в сомнение, особенно если он прикреплен не слишком высоко (рис. 107, *в*).

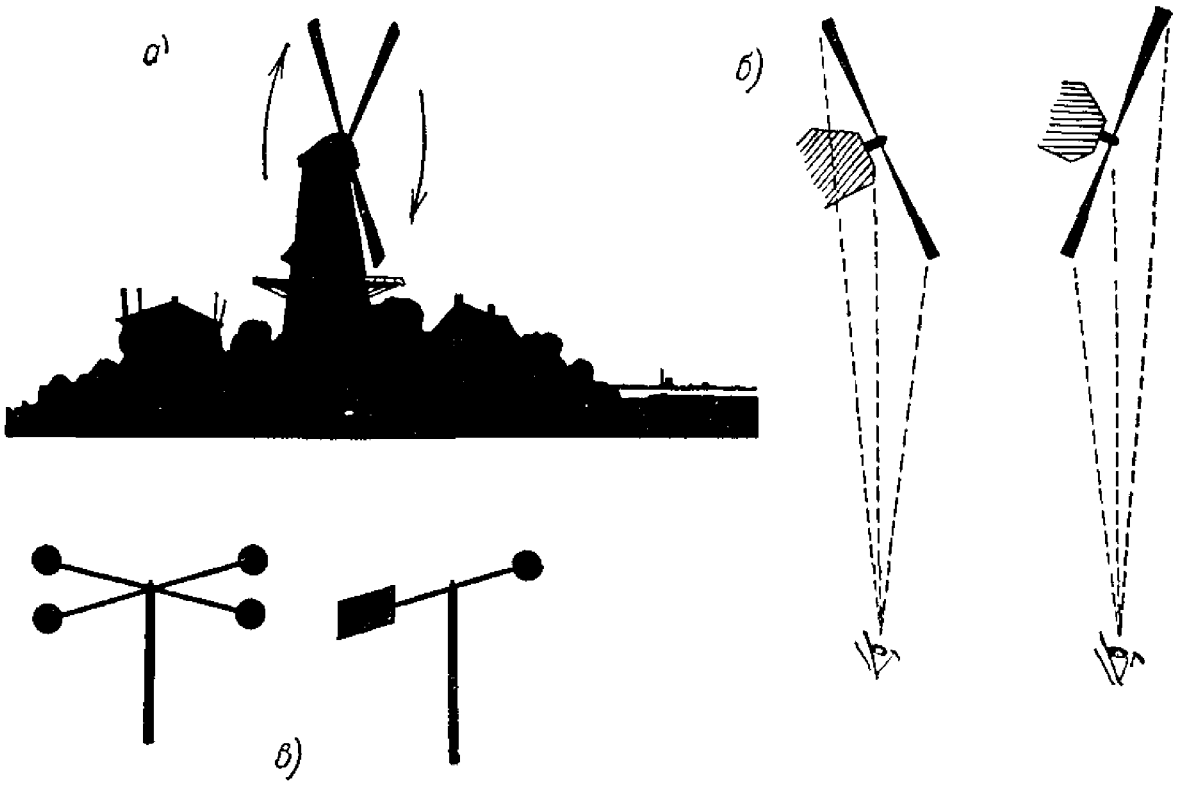



Рис. 107. Силуэт ветряной мельницы в сумерки: *а*) то, что видит наблюдатель; *б*) как он может истолковать свое наблюдение; *в*) другие обманчивые силуэты.

Во всех этих случаях наш вывод о направлении вращения зависит от того, какая часть траектории кажется ближе к нам. Та часть, которой случится привлечь наше внимание сильнее, кажется, вообще говоря, ближе. Смену видимого направления вращения следует поэтому приписать внезапному изменению нашего внимания.

## 120. Стереоскопические явления

Курьезное явление можно наблюдать, если смотреть сквозь окно железнодорожного вагона со стеклом невысокого качества. Подождите, пока поезд остановится, и поглядите внимательно на камни близ полотна. Держа голову прямо, прижмитесь лицом к стеклу и отбросьте предвзятое представление о том, что Земля должна казаться плоской. Внезапно вы обнаруживаете, что она выглядит волнистой, и притом весьма значительно. Если медленно двигать голову параллельно стеклу, «волны» перемещаются по Земле

в противоположном направлении, если же отодвинуться от окна, они почти не теряют в высоте, но становятся шире.

Объяснение состоит в том, что оконное стекло не является совершенно плоским; толщина его меняется, хотя и незначительно. Как правило, эти неровности параллельны некоторому определенному направлению, поскольку стекло было изготовлено путем прокатки расплавленной стеклянной массы между стальными валками. Такая неровность эквивалентна призме с малым углом преломления и вызывает некоторое отклонение световых лучей. Если на рис. 108 глаза $L$ и $R$ направлены в точку $A$ на Земле, то непостоянная толщина стекла не обнаруживается. Однако если смотреть в точку $B$, луч $BR$ уже не является прямым; он преломляется и идет по линии $BCR$. В результате взгляд оказывается направлен так, как если бы он был устремлен в точку $B'$, лежащую ближе к нам, нежели $B$. В другой части стекла отклонение лучей будет иным, и предмет кажется, наоборот, удаленным. Это позволяет понять, почему незначительная неровность стекла порождает иллюзию

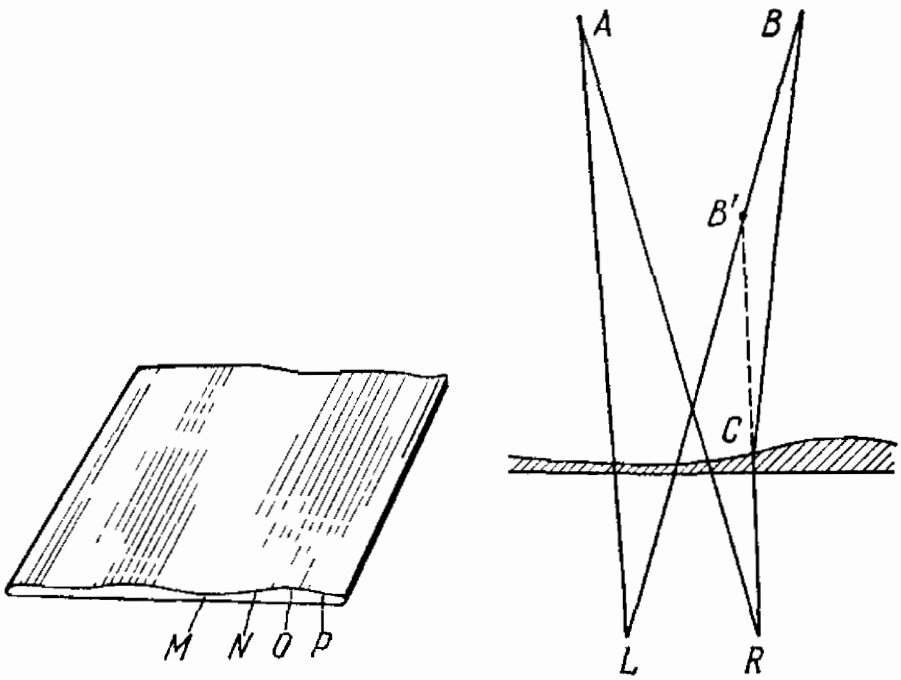



Рис. 108. Земля кажется волнистой, если смотреть на нее сквозь стекло непостоянной толщины.

сильной волнистости внешних предметов, хотя иногда способ сочетания изображений, получающихся в каждом глазу, довольно сложен.

Если, например, левый глаз смотрит сквозь ровную, а правый — сквозь неровную часть стекла, то нетрудно проследить подробности возникновения стереоскопического эффекта. Закройте левый глаз и покачайте головой. Изображение качнется в том же направлении там, где стекло вогнуто ($M$, рис. 108) и в противоположном — там, где оно выпукло ($O$). (Почему?) Если открыть теперь оба глаза,

части *M* и *O* соответствуют местам на Земле, которые мы видим на нормальных расстояниях. Глядя правым глазом сквозь *N*, мы увидим гребень, а сквозь *P* — углубление. Постарайтесь проверить все это на собственном опыте и разобраться во всех подробностях.

Тесно связанное с описанным явление мы можем наблюдать, стоя близ водной поверхности, покрытой легкой рябью. Мы пытаемся, скажем, найти отражение ветви дерева, но поскольку оба глаза направлены не в одну и ту же точку волнистой поверхности, постольку оба изображения видны на непрерывно меняющихся угловых расстояниях друг от друга. Это вызывает очень странное ощущение, с трудом поддающееся описанию. Как только мы закрываем один глаз, поверхность становится едва заметной, и можно вообразить, что видишь само гнущееся под ветром дерево, а не его отражение. Если мы снова посмотрим обоими глазами, то внезапно обнаруживаем покрытую рябью блестящую поверхность; блеск характерен для тех случаев, когда мы воспринимаем одновременно два сильно различающихся изображения: одним глазом светлое, а другим — темное.

## 121. Иллюзии расстояния и величины

Когда флюгер, украшавший верхушку башни, оказывается внизу, он кажется нам необыкновенно большим.

Когда художник золотит стрелки часов на высокой башне, он, наоборот, кажется нам маленьким, как кукла. Такими же маленькими кажутся нам люди, поднявшиеся на башню и прогуливающиеся по ее галерее.

Хотя статуя Виктории на фасаде Амстердамского музея имеет в вышину 2,2 *м*, она нам кажется меньше роста человека. Две человеческих фигуры на золотых часах на здании музея имеют высоту 1,52 *м*, а нам кажутся игрушечными. Во всех этих случаях мы, очевидно, недооцениваем расстояние, на котором находится наблюдаемый нами предмет, поэтому они и кажутся нам такими маленькими.

С подобными иллюзиями мы встречаемся при наблюдениях Солнца и Луны, но здесь уже вопросы решаются более сложно.

## 122. «Человечек» на Луне *)

«Человечек» на Луне служит прекрасным предостережением для тех, кто проводит наблюдения без должной объективности. Темные и светлые пятна на Луне в действительности являются равнинами и

*) Harley, Moon-Lore, London, 1885; Titchener, Experimental Psyhology.

горами, которые, разумеется, распределены по поверхности совершенно случайно. Бессознательно мы стремимся различить в этом причудливом распределении света более или менее привычные формы; мы фиксируем внимание на отдельных деталях, которые в результате оказываются яснее и примечательнее, в то время как подробности, которым не уделено внимания, становятся менее отчетливыми. Так, на полной Луне можно видеть человеческое лицо, по крайней мере, в трех аспектах: в профиль, в три четверти и анфас, а также женскую фигуру, старуху с вязанкой хвороста, зайца, омара и т. д.

Иллюзиям подобного рода подвержены даже лучшие наблюдатели. Это следует иметь в виду в связи с многочисленными фантастическими описаниями миражей или фата-морганы.

## 123. Искривление прожекторного луча *). Гряды облаков

Прожектор бросает узкий горизонтальный луч над большим открытым пространством. Хотя я знаю, что луч идет строго по прямой, я не могу отделаться от иллюзии, что он искривляется, приподнимаясь в середине и опускаясь по обоим концам. Единственный способ убедить себя в том, что луч действительно прямолинеен — это подержать перед глазами палочку.

В чем причина этой иллюзии? Я склонен считать, что свет идет по кривой благодаря тому, что я вижу, как с одной стороны луч опускается вправо, а с другой — влево, но я забываю, что я повернулся. Но разве прямые линии обыкновенных горизонтальных телеграфных проводов ведут себя иначе? Ночью, однако, глядя на световые лучи, я не вижу окружающих предметов, помогающих мне оценить расстояния, и мне заранее ничего неизвестно о форме луча.

Подобное явление можно наблюдать, глядя ночью вдоль цепочки высоких уличных фонарей, в особенности когда нет параллельного ряда домов или когда дома скрыты за деревьями. Цепочка огней выглядит искривленной, как и луч прожектора **). Сюда же непосредственно относится и такое наблюдение между первой четвертью и полнолунием: линия, соединяющая рога лунного серпа, никак не кажется перпендикулярной к линии, направленной от Солнца к Луне. Нам кажется, что этот перпендикуляр должен изогнуться, чтобы дойти до Солнца. Зафиксируйте направление, туго натянув перед глазами кусок веревки. Как это ни странно поначалу, вы обнаруживаете, что линии перпендикулярны!

---

*) Bernstein, Zs. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane **34**, 132.

**) G. Ten Doesschate, Nederl. Tijdschr. voor Geneesk. **74**, 748, 1930.

Гряды облаков, расходящиеся от горизонта и встречающиеся вновь на другом краю небесного свода, в действительности идут прямо, горизонтально и параллельно друг другу (см. также фотографию XIII).

Если стоять ночью близ маяка спиной к нему, то можно наблюдать весьма впечатляющее зрелище. Кажется, что длинные лучи, простертые над местностью, сходятся к воображаемой точке — «противоисточнику», расположенному чуть ниже горизонта, и вращаются около этой точки *). Наблюдая один из таких лучей, можно только решить, что он лежит в плоскости, определенной его истинным положением в пространстве и точкой, занятой моим глазом. При повороте луча положение этой плоскости в пространстве непрерывно меняется, но она продолжает проходить через линию, соединяющую маяк, глаз и «противоисточник». Таким образом, вместо того чтобы рассматривать лучи как горизонтальные линии, исходящие из точки позади меня, я могу вообразить, что вижу верхнюю часть лучей, вращающихся вокруг расположенного за горизонтом «противоисточника». Тот факт, что я бессознательно связываю эти лучи со второй точкой, примечателен с точки зрения психологии и обусловлен тем, что сходящиеся линии мы склонны объединять вместе и продолжать до точки схода.

Здесь помогает нам также «недооценка дальности расстояния» (§ 129), благодаря чему кажется, что световой пучок не беспредельно простирается вдаль, но стремится к точке, которая находится на определенном расстоянии от нашего глаза.

Если стать под прямым углом к направлению на маяк и взглянуть вверх, то можно заметить, что каждый световой пучок как бы сжимается, и нам кажется, что лучи света и луч «противоисточника» вдруг поднялись и встретились где-то в зените **).

## 124. Кажущаяся сплюснутость небесного свода ***)

Когда, стоя в открытом поле, мы оглядываем небо, то обычно оно не кажется бесконечным или не создает впечатление полного полушария, прикрывающего Землю. Скорее оно напоминает свод, высота

---

*) G. Colange, Y. Le Grand, C. R. Paris **204**, 1882, 1937; авторы придерживаются ошибочного мнения, будто это явление видимо лишь при исключительных обстоятельствах, какие создаются мощным маяком Бель-Иль. Однако его столь же хорошо можно, например, наблюдать близ слабого маяка Де Куг в Нидерландах. (См. G. Ten Doesschate, F. P. Fischer, Ann. d'Oculistique **176**, 103, 1939.)

**) L. Dunoyer, C. R. Paris **205**, 867, 1937.

***) Весьма обширную литературу по этому и следующему вопросам см. A. Müller, Die Referenzflächen der Sonne und Gestirne, E. Reimann, Zs. f. Psych. u. Physiol. der Sinnesorgane, 1920; R. Sterneck, Der Sehraum auf Grund der Erfahrung, Leipzig, 1907.

которого над головой меньше, чем расстояние от нас до горизонта (рис. 109). Это всего лишь представление и не больше, но для многих оно убедительно; объяснять его следует не физическими, а психологическими причинами.

Естественно, нельзя каким-либо образом измерить эту сплюснутость, но оценить ее можно:

а) Начнем с вопроса, каким может быть отношение расстояний «глаз-горизонт» и «глаз-зенит». Ответы большей частью лежат между 2 и 4, в зависимости от наблюдателя и от обстоятельств, при которых ведутся наблюдения.

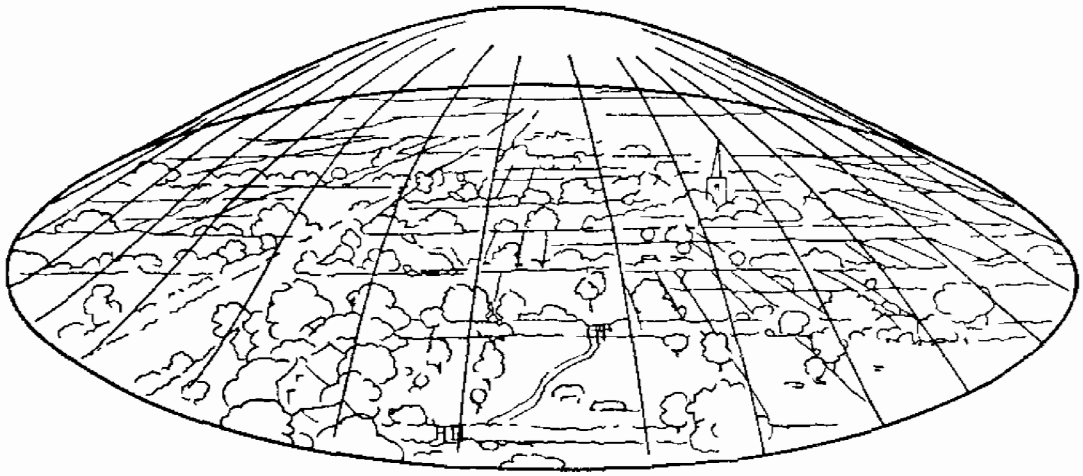


Рис. 109. Небо кажется покрывающим землю подобно куполу.

б) Определим по мере возможности направление, в котором располагается середина *дуги*, соединяющей зенит с горизонтом. Измерив положение этой середины, мы с удивлением обнаруживаем, что она лежит не на высоте 45°, но много ниже — преимущественно на высоте 20—30°; изредка указывались меньшие величины — до 12°, и бóльшие — до 45°.

Важно найти непредубежденного наблюдателя, для которого было бы ясно, что на две части должна делиться *дуга*, а не *угол*. Очень важно также правильно определить положение зенита: лучший способ для этого — встать лицом сначала к одной, а затем к другой стране света и посмотреть, согласуются ли между собой полученные оценки.

Желательно брать среднее из пяти значений для каждого приведенного выше определения а) и б).

Кажущаяся сплюснутость неба зависит от множества обстоятельств. Она сильно растет в сумерки или при облачности, особенно при высококучевых и слоистокучевых облаках, которые создают впечатление глубины и могут быть прослежены вплоть до горизонта; она уменьшается, когда ярко сияют звезды. В среднем высота «полудуги» между горизонтом и зенитом определяется днем в 22°, а ночью — в 30°. Отметим, что особую ценность имеют такие

наблюдения на море, где горизонт открыт со всех сторон, и ничто не отвлекает внимания и не мешает оценке.

Сквозь кусок красного стекла (достаточно большой, чтобы края его не мешали наблюдениям) небо кажется более плоским, а сквозь синее стекло — более высоким и выпуклым *).

Детализация оценок может доставить нам более точные сведения о той форме, которую мы бессознательно приписываем небу. Многим наблюдателям небосвод кажется шлемовидным (рис. 109).

## 125. Переоценка угловой высоты (рис. 110)

Кажущаяся сплюснутость небесного свода связана, вероятно, с тем, что мы вообще переоцениваем угловое превышение над горизонтом. Ясно, что измерение дуги мы постоянно и бессознательно путаем с измерением угла; точка $M$, выбранная так, чтобы $HM = MZ$, находится много ниже 45° над горизонтом, хотя нам она представляется лежащей посередине между горизонтом и зенитом.

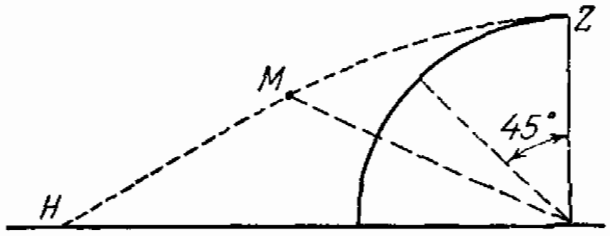



Рис. 110. Деление пополам воображаемой дуги, соединяющей зенит с горизонтом.

Нам кажется, что зимнее Солнце в полдень стоит довольно высоко в небе, хотя в наших широтах его высота равна всего 15° над горизонтом. Летом оно доходит почти до зенита, в то время как на самом деле его высота едва достигает 61°.

Точно так же мы переоцениваем высоту холмов и крутизну встающего перед нами склона. Наблюдатели описывали даже случаи, когда протяжение 22-градусного гало вокруг Солнца или Луны (§ 150) по вертикали казалось больше горизонтального.

Найдите вечером звезду примерно в зените. Повернитесь в полоборота и посмотрите еще раз на ту же самую звезду. Вы поразитесь, как далеко она теперь от зенита. Ее высота будет около 70°!

## 126. Кажущееся увеличение размеров Солнца и Луны близ горизонта

Это одна из наиболее сильных и наиболее общеизвестных оптических иллюзий. Поднимающаяся Луна может быть очень большой, но высоко в небе она становится поразительно маленькой. А заходящее Солнце, «огромное, красное как помидор, Солнце все растет и растет».

Но в конце концов, иллюзия ли это? Получим проекцию солнечного диска и измерим ее. Возьмем очковое стекло с фокусным рас-

*) Dember, Uibe, Ann. Phys. **61**, 313, 1920.

стоянием около 2 *м**), вставим его в щель, прорезанную в пробке, и поместим на подоконник, куда падают лучи заходящего Солнца (рис. 111). Окно должно быть открытым, иначе оконное стекло ослабит четкость изображения. Держа теперь лист бумаги примерно в 2 *м* позади линзы, мы получим на бумаге прекрасное, отчетливое изображение Солнца. Если оно будет не совсем круглым, это значит, что линза расположена не вполне перпендикулярно к падающим лучам; тогда попробуйте слегка наклонять ее и поворачивать в разные стороны. Когда, наконец, вы точно определите, где нужно поместить бумагу, чтобы добиться максимально четкого изображения Солнца, обозначьте его диаметр карандашными метками и измерьте линейкой с точностью до 0,5 *мм*. Предпочтительнее измерять диаметр по горизонтали, потому что по вертикали он может быть несколько сжат вследствие преломления в атмосфере. Повторите эти измерения несколько раз и выведите среднее значение.

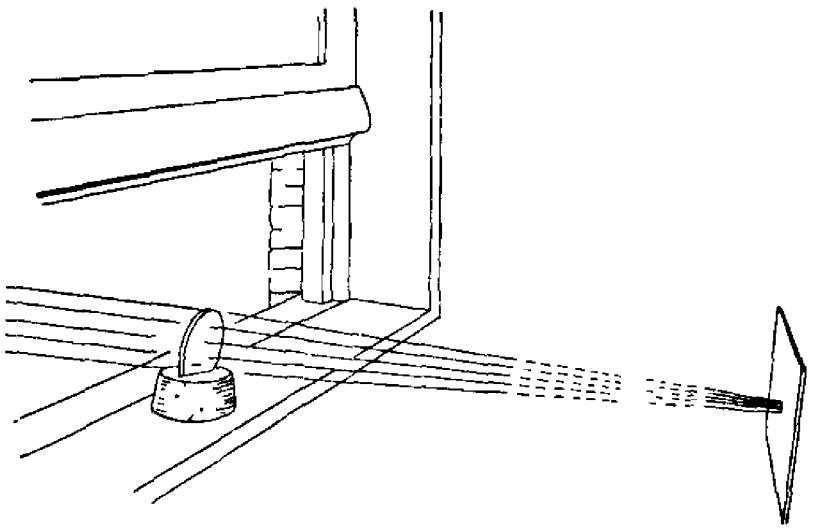


Рис. 111. Получение изображения Солнца при помощи стекла от очков с большим фокусным расстоянием.

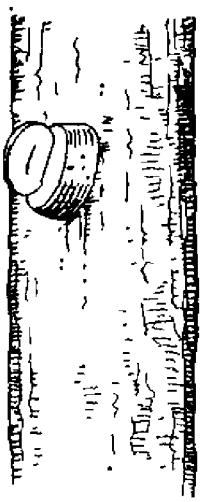


Рис. 112. Очковое стекло с помощью пробки закреплено на дереве

Затем проведите тот же опыт, когда Солнце стоит высоко. Устройство будет немного иным. Прикрепите пробку со вставленной линзой высоко на столбе. Выбрав на столбе надлежащую сторону и поворачивая пробку вокруг гвоздя, вы можете расположить линзу почти перпендикулярно к световым лучам (рис. 112). Измерьте изображение Солнца; с учетом ошибок наблюдения оно окажется одинаковым и при низком и при высоком положении светила. Даже самые точные наблюдения с помощью мощных телескопов не обнаружили каких-либо следов различия.

Таким образом, увеличение размеров Солнца и Луны близ горизонта — явление психологическое. Но даже и оно подчиняется определенным законам и поддается количественной оценке. Возьмите белый картонный диск диаметром 30 *см* и станьте сами на таком расстоянии, чтобы его величина совпала с величиной лунного диска.

*) Оптики называют такие стекла «+0,50». Спрашивайте круглые стекла с необработанными краями.

Разумеется, это нельзя сделать путем прямого сопоставления, иначе, как и в случае измерения, вы обнаружите, что эта величина остается всегда неизменной. Необходимо поэтому посмотреть сначала на Луну и постараться запомнить, каковы ее размеры, а затем повернуться и сравнить это представление с видимыми размерами картонного диска. Еще лучше прикрепить ряд белых дисков на черном фоне, а затем отходить и останавливаться всегда на одном и том же расстоянии от них. Сделайте эти оценки и когда Луна высоко в небе, и когда она низко.

Подобные оценки можно сделать и для Солнца. Чтобы вас не ослепило при взгляде на Солнце, пользуйтесь темным стеклом, например, сильно засвеченной фотопластинкой, а на диски смотрите незащищенным глазом. Наблюдения затрудняются тем, что на психологическое явление влияет множество неуловимых факторов; меняется внимание, которое вы уделяете наблюдениям, и т. д. Заметьте, насколько лучше идет дело после небольшой практики!

Полученные этим путем числа показывают, что Солнце и Луна близ горизонта кажутся в 2,5—3,5 раза больше, нежели высоко в небе. Различие между физическим и психологическим явлением оказывается поразительным! В сумерки и при облачном небе эффект бывает еще значительнее.

Кажущееся возрастание размеров заходящего Солнца поражает нас на равнине много больше, чем в горах; на море, однако, это возрастание очень невелико *).

Звезды тоже кажутся на горизонте больше, даже фигуры Гайдингера (§ 200) кажутся в таком положении вдвое шире и длиннее, чем когда светила располагаются высоко в небе.

Посмотрите на Луну сквозь кольцо, образованное большим и указательным пальцами, или сквозь трубку,— Луна покажется меньше Людям с одним глазом Солнце и Луна не кажутся больше у горизонта. Если закрыть один глаз темной повязкой, в течение некоторого времени иллюзия еще сохранится, но в конце вечера она исчезнет **).

## 127. Связь между кажущимся увеличением размера небесных тел близ горизонта и формой небесного свода (рис. 113)

Были предприняты попытки свести описанное выше явление к кажущейся сплюснутости небесного свода. Идея состоит в том, что мы представляем себе Солнце и Луну на таком же расстоянии от нас, как и окружающее их небо; поэтому низкое Солнце покажется нам

---

*) См. V Cornish, Scenery and the Sense of Sight, Cambridge, 1935, ch 11, где содержится интересная теория этого явления.

**) Sky and Telescope **11**, 135, 1952

во много раз дальше, чем высокое, а поскольку его угловой диаметр остается одинаковым, постольку бессознательно мы приписываем Солнцу в несколько раз бо́льшую величину. Из рис. 113 мы видим, что при одинаковом для обоих положений Солнца угле $\alpha$ ($\alpha_1 = \alpha_2$)

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Для проверки этой формулы были подвергнуты оценке видимые размеры Солнца и Луны на различных высотах над горизонтом (ср. § 126). Эти опыты достаточно трудны. Результаты, полученные днем при ясном небе и в безоблачные звездные ночи, доказывают, что кажущиеся размеры Солнца и Луны в самом деле колеблются в той или иной мере пропорционально расстоянию до небесного свода. Близость облаков (но не наземных предметов, вырисовывающихся на горизонте) приводит к тому, что низкое Солнце кажется больше; причина здесь в том, что облачное небо выглядит более сплющенным, нежели безоблачное, и следовательно, гораздо более отдаленным от нас у горизонта, а мы невольно отодвигаем Солнце настолько, чтобы не могло возникнуть и мысли, будто оно находится перед облаками.

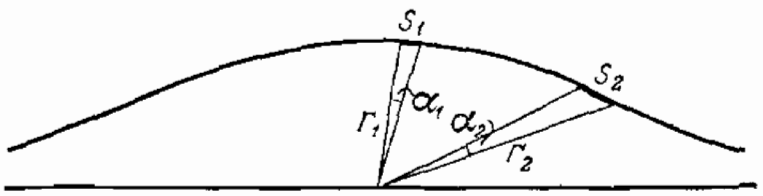



Рис. 113. Там, где небесный свод кажется более далеким, солнечный диск выглядит увеличенным.

Точно так же Луна, когда она стоит низко, представляется днем большей, если небо поблизости покрыто облаками. Весьма примечательно, что в сумерках при ясном небе Луна кажется больше, чем днем или ночью: это согласуется с бо́льшей сплюснутостью небесного свода в сумерки. В туманную ночь, когда Луна ярко освещает прилегающие части неба, нам кажется, будто слегка сплюснутое ночное небо снова заменил плоский сумеречный свод, и Луна опять выглядит больше. Тех, кто склонен думать, будто кажущееся увеличение лунного диска близ горизонта или в тумане связано с падением интенсивности света, можно переубедить следующими наблюдениями: а) лунный *серп* не кажется большим в тумане, что легко понять, ибо серп лишь немного освещает прилегающее небо; б) во время лунного затмения расположенная высоко Луна не выглядит увеличенной. Из всего сказанного ясно, что главным и основным является здесь небо в качестве фона, и именно оно определяет нашу оценку размеров Солнца и Луны. Мы должны, однако, учесть, что имеются также возражения против предположения о тесной связи между этими двумя явлениями: многие видят Солнце и Луну у горизонта ближе, чем где-либо в другом месте, или же вообще неспособны сказать что-либо относительно кажущегося расстояния, не-

смотря на отчетливо воспринимаемое увеличение размеров. По моему мнению, возражения такого рода нельзя признать решающими, так как весьма вероятно, что, ставя прямо вопрос о расстоянии, мы возбуждаем иные психологические импульсы, нежели те, которыми преимущественно определяется наше бессознательное суждение.

## 128. Вогнутая Земля *)

Это — оборотная сторона зрительного представления, порожденного небесным сводом. Когда воздух чист, поверхность Земли, обозреваемая с воздушного шара, как бы выгибается по краям, так что нам кажется, будто мы летим над обширной вогнутой равниной. Горизонтальная плоскость, проведенная через наш глаз, неизменно представляется нам ровной, другие же горизонтальные плоскости, расположенные выше или ниже нас, изгибаются по направлению к этой фиксированной плоскости.

Если воздушный шар на протяжении нескольких километров плывет над облачной грядой, то пелена облаков тоже кажется изогнутой; выпуклой частью она обращена к Земле, а вогнутой — кверху. Если нам случится быть между двумя слоями облаков, одним наверху, а другим внизу, мы будем чувствовать себя так, как если бы летели между двумя огромными часовыми стеклами. Аналогичные наблюдения можно провести с самолета. Мне лично Земля кажется вогнутой, но намного меньше, чем небосвод.

## 129. Теория «недооценки»

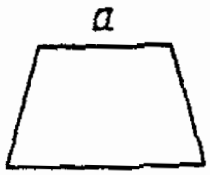
Штернеку удалось искусно вывести формулу для столь смутного психологического явления, как «небесный свод». По-видимому, он не дал полного объяснения этого явления, однако по крайней мере связал его с большой группой наблюдений, знакомых нам из повседневного опыта.

Чем дальше находятся предметы, тем труднее становится определить расстояния до них. Все уличные фонари дальше 160—170 *м* ночью кажутся расположенными на одинаковом расстоянии. Ни одна из видимых на горизонте гор и ни одно из небесных светил не кажется нам дальше, чем другие. Средний неискушенный наблюдатель недооценивает все большие расстояния; в качестве примера можно привести ночной костер или огни гавани, видимые в открытом море.

Для близких предметов эта недооценка незначительна, но она возрастает с увеличением расстояния до предмета; наконец, кажущееся расстояние достигает предела. Прямоугольные поля, видимые из поезда, напоминают трапецию, потому что угол, стянутый сторо-

*) G. Flammarion, L'Atmosphère, 1888, p. 169.

ной $a$, соответствует ее истинному расстоянию, но слишком мал для ее кажущегося расстояния. Когда поезд приближается к тунелю и вы смотрите из окна на кирпичную стену при въезде, то кирпичи кажутся раздувшимися и становятся шире *). Это объясняется тем, что коль скоро истинное расстояние уменьшается вдвое, кирпичи стягивают вдвое больший угол, однако кажущееся расстояние сокращается всего раза в полтора, и потому возникает такое впечатление, как если бы сами кирпичи увеличились в размерах.




Наоборот, если вы стоите на задней площадке поезда или трамвая и всматриваетесь вдаль, то вы увидите как телеграфные столбы очень быстро уменьшаются, по мере того, как они удаляются от вас**). Мы недооцениваем скорость и расстояние, и потому угол, под которым мы видим столб, оказывается меньше ожидаемого.

Фон Штернек попытался связать кажущееся расстояние $d'$ и истинное $d$ следующим простым выражением:

$$d' = \frac{cd}{c+d},$$

где $c$ — наибольшее расстояние, поддающееся оценке при данных условиях освещения (эта величина постоянна для каждого отдельного случая); $c$ колеблется от 200 *м* до 20 *км*. Как мы видим, по этой формуле $d'$ практически равно $d$, пока $d$ невелико по сравнению с $c$; если $d$ становится величиной порядка $c$, недооценка возрастает; если же $d$ больше, кажущееся расстояние стремится к пределу. Таким образом, формула дает хорошее качественное описание опыта, а тщательные наблюдения показали также неожиданно хорошее количественное согласие.

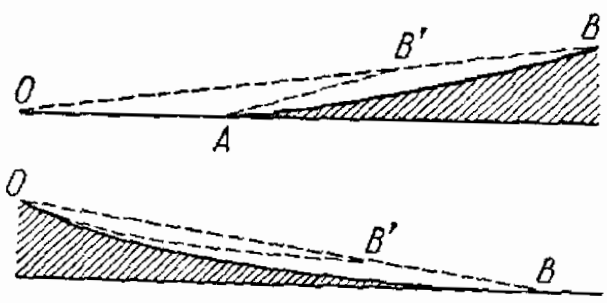



Рис. 114. Наблюдатель $O$ переоценивает поднимающийся и недооценивает падающий склон.

Теория «недооценки» объясняет, почему наблюдатель $O$ (рис. 114), стоящий у подножья горы, переоценивает крутизну склона, рассматривая расстояние $OB$ так, как если бы оно равнялось $OB'$, т. е. принимая $AB$ за $AB'$. Как логическое следствие, отсюда вытекает и недооценка крутизны склона наблюдателем, стоящим на вершине (рис. 114). Посмотрим теперь, как эта теория может объяснить видимую форму небесного свода и кажущееся увеличение размеров небесных тел у горизонта.

---

*) E. Mach, Erkenntnis und Irrtum, Leipzig, 1905, S. 331.

**) Из наблюдений проф. Е. К. Хазелгофа.

Представим себе слой облаков на высоте 2,5 *км* над головой. Этот слой должен был бы напоминать очень слабо изогнутый свод, поскольку вследствие кривизны земной поверхности наш глаз находится на расстоянии около 178 *км* от слоя облаков у горизонта и всего в 2,5 *км* от слоя — в зените. Облачное небо выглядит, однако, совсем не так! Малое расстояние недооценивается лишь немного, зато большое — очень сильно.

Допустим, что мы считаем отношение

$$\frac{\text{глаз — горизонт}}{\text{глаз — зенит}}$$

равным примерно 5; это значит, что при таких обстоятельствах $c = 10{,}6$ *км*; там формула недооценки дает правильные значения (попытайтесь выполнить расчет сами). Отсюда следует, что облачное небо должно представляться нам одним из видов свода — гиперболоидом вращения, что согласуется с нашими обычными впечатлениями.

Заметьте, что таким образом мы в действительности видим небесный свод отнюдь не сплющенным, но, напротив, относительно б о л е е в ы с о к и м, чем он есть в действительности.

Но как сбстоит дело с ясным дневным и со звездным небом? Фон Штернек просто берет каждый раз новое значение постоянной $c$, и его формула с удивительной точностью описывает наблюдения в каждом случае. Трудно, однако, понять, как можно в этих случаях говорить о недооценке каких-то «расстояний». И это приводит нас к более общему вопросу: каким образом мы вообще получаем представление о расстояниях до таких неопределенных предметов, как облака? А синее небо? А безоблачное ночное небо? Теория недооценки, вероятно, полезна, пока мы имеем дело с наземными объектами, в отношении которых мы из опыта можем судить о размерах и расстояниях, но весьма сомнительно, чтобы ее можно было применить к небу. Кроме того, причина недооценки остается до сих пор неизвестной.

## 130. Гауссова теория зрительных направлений

С изложенным в предыдущем параграфе связан ряд наблюдений, показывающих, что форма небесного свода и кажущееся увеличение размеров небесных светил у горизонта зависят от направления взгляда по отношению к нашему телу. Исходя из этого, Гаусс предположил, что опыт многих поколений заставил нас лучше приспособиться к наблюдению предметов, расположенных перед нами, нежели над нами, и что это влияет на нашу оценку расстояний и размеров.

В полнолуние, когда Луна сияет высоко в небе, сядем в кресло или прямо на землю и откинемся назад. Если сильно отклониться назад, держа при этом голову в обычном положении, и посмотреть на Луну, то она покажется заметно увеличенной. Если же вдруг подняться, не спуская глаз с Луны, то она снова покажется меньше. Наоборот, полная Луна близ горизонта выглядит много меньшей, когда мы наклонимся вперед.

Оба явления можно наблюдать попеременно, когда Солнце находится на высоте 30—40° и свет его умеряется туманом. Наклоняйтесь вперед и назад, и диск будет казаться то меньше, то больше. Лягте, прижавшись спиной к Земле; небо покажется приплюснутым с той стороны, куда направлена ваша голова; с противоположной стороны оно имеет строго сферическую форму (рис. 115). Это ясно показывает, что в данном положении практически безразлично, *направлен ли взгляд вниз или вперед (по отношению к нашему телу)*; но если взгляд направлен вверх, то предметы кажутся сплюснутыми.

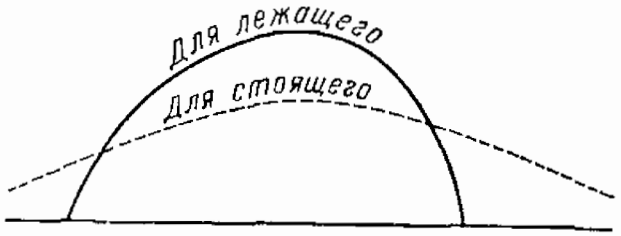



Рис. 115. Форма небесного свода для стоящего и лежащего наблюдателя.

Если повиснуть на турнике вниз головой и посмотреть вокруг, то небо будет иметь форму полусферы *).

Все эти наблюдения согласуются друг с другом. Кроме того, созвездия, видимые в телескоп, т. е. независимо от каких-либо внешних влияний пейзажа, кажутся больше, когда они расположены низко над горизонтом. Единственное, что может сказываться здесь — это направление взгляда **).

Не пытайтесь производить дальнейшую проверку, оценивая видимый размер Солнца и Луны через зеркало так, чтобы видеть, например, Луну высоко в небе, когда взгляд направлен горизонтально. Если наблюдатель так или иначе знает о наличии зеркала, иллюзия частично утрачивается. Поэтому опыты такого рода проводить весьма затруднительно.

Другие теории, относящиеся к описанным выше зрительным впечатлениям, легко опровергаются. Была, например, выдвинута «физическая теория» небесного свода, построенная на непонятном принципе, что небо кажется тем отдаленнее, чем оно ярче, и что расстояние изменяется пропорционально корню квадратному из яркости. Синее небо в зените темнее, чем у горизонта, и из-за этого оно будто бы кажется ниже. Однако эта теория опровергается уже тем,

---

*) O. Baschin, Naturwiss. **7**, 510, 1919; **13**, 346, 1925.
**) J. van der Bilt, Hemel en Dampkring **7**, 56, 1909.

что небо, равномерно покрытое облаками, в зените бесспорно ярче, чем у горизонта, и все-таки кажется сплюснутым. Помимо того, при пасмурном небе облака, расположенные перед Солнцем и более яркие, чем остальные, всегда кажутся нам ближе, нежели соседние участки неба.

## 131. Как влияют земные предметы на оценку расстояния до небесного свода *)

Если, стоя перед длинным рядом домов, смотреть на те, которые расположены прямо перед вами, небо над ними будет казаться ближе, чем над дальними домами. Небо над лесом нам кажется ближе, чем небо над чистым полем.

На глаз мы оцениваем расстояние до неба в 50—60 *м*! Но если мы знаем, что видимые предметы очень далеки от нас, этого достаточно, чтобы их фон — небо — казался много дальше. В какой-то мере каждый земной предмет имеет фоном небо. Это показывает, что все описанные явления должны быть чисто психологического свойства и что невозможно говорить об идеальной «поверхности сравнения», какой мог бы быть для нас небесный свод.

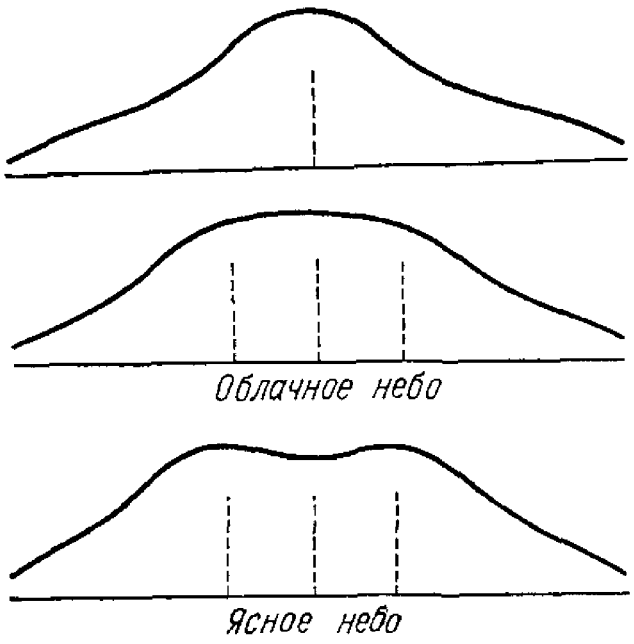



Рис. 116. Кажущаяся форма неба над радиомачтами.

Взгляните на длинный рельсовый путь или на обсаженную деревьями дорогу, которые создают ощущение большого расстояния: в этом направлении небо кажется нам много дальше, чем во всех других. Однако если заслонить пейзаж до горизонта листком бумаги, небо сразу же приблизится.

Напротив, если мы переведем взгляд *вверх*, небо покажется выше. Это явление особенно поражает, когда стоишь у подножья высокой башни или, еще лучше, близ длинных тонких мачт мощной радиостанции. Небо кажется изогнутым подобно куполу, а между трех мачт — приподнятым **). Разные наблюдатели независимо друг от друга одинаково изображают эту кажущуюся форму неба (рис. 116).

Если, глядя в направлении одной из мачт, делить пополам дугу, соединяющую горизонт с зенитом (§ 124), то точка деления окажется

---

*) G. Ten Doesschate, Nederl. Tijdschr. voor Geneesk. **74**, 748, 1930; Pohl, Naturwiss. **7**, 415, 1919

**) H. Stücklen, Diss., Göttingen, 1919.

гораздо выше, чем в том случае, когда вы производите такое деление, стоя спиной к мачте и на некотором расстоянии от нее. Прикройте чем-нибудь горизонт, глядя на мачту: углы, стянутые нижней частью дуги, кажутся теперь больше 45° и достигают даже 56°, а это означает, что небесный свод выглядит более выпуклым, чем полусфера!

Как ни убедительны эти наблюдения, сами по себе они не могут объяснить ни формы небесного свода, ни кажущегося увеличения размеров небесных тел у горизонта. Даже если смотреть сквозь очень темное стекло, Солнце всегда будет казаться маленьким, когда оно высоко, и большим, когда оно низко, хотя бы пейзажа вообще не было видно.

## 132. Кажущиеся размеры Солнца и Луны в сантиметрах. Метод последовательных образов *)

Известно, что в линейных мерах мы не можем оценить размеры Солнца и Луны; можно лишь определить их угловые диаметры. Примечательно, тем не менее, что многие люди утверждают, будто они видят небесные тела величиной с глубокую тарелку, в то время как для меньшинства эти тела выглядят величиной с монету. Если вам захочется улыбнуться, вспомните, что даже человек, обладающий научной подготовкой, *ощущает* всю невозможность оценить видимую величину лунного диаметра — как 1 *мм* или 10 *м*, поскольку он *знает*, что на расстоянии 10 *см* экран размером 1 *мм*, а на расстоянии 1000 *м* — размером 10 *м* в точности закрывает Луну. Психологические факторы, играющие здесь роль, до сих пор еще очень мало изучены.

Как известно, последовательный образ Солнца можно получить, если быстро взглянуть на него, а потом прикрыть глаза (§ 101). Этот последовательный образ проектируется на любой предмет, на который мы затем смотрим. На ближней стене он выглядит очень маленьким и незаметным, на дальних предметах — кажется гораздо больше. (Заметьте, что мы должны оценивать его «собственную» величину, а не стянутый им угол.) Этот эффект совершенно понятен: если предмет на расстоянии стягивает тот же угол, что и близкий к нам предмет, то линейные размеры его должны быть больше. Когда последовательный образ равен по величине самому Солнцу или Луне? По мнению разных наблюдателей, это происходит, если стена находится на расстоянии от 50 до 60 *м*, безразлично, днем или ночью. Следовательно, таким мы и ощущаем расстояние до Солнца

*) Plateau, Bull. Acad. Belg. **49**, 316, 1880, G. Ten Doesschate, Nederl. Tijdschr. voor Geneesk. **74**, 748, 1930.

или Луны. Поскольку стягиваемый угол равен $\frac{1}{108}$, мы получаем соответственно величину диаметра от 45 до 55 *см*.

Таким же путем доказано, что на стене, отстоящей более чем на 60 *м*, последовательный образ сохраняет ту же величину, что и прямо перед нами на небе (близ горизонта), однако будучи спроектирован высоко в небе, последовательный образ определенно выглядит меньшим, чем на стене в 60 *м* от нас. Это еще раз подтверждает, что расстояние до зенита кажется нам меньшим, чем расстояние до горизонта, и что величина 60 *м* представляет собой «предельное расстояние» согласно теории недооценки (ср. § 129).

## 133. Пейзаж в живописи

Делая эскизы, Воган Корниш *) пытался определить угловые размеры поля зрения, которое человек видит как одно целое, как одну картину. Общее впечатление от пейзажа во многом зависит от этого. Поле зрения было меньше на равнине, больше в горной местности, больше ночью и меньше днем.

---

*) Scenery and the Sense of Sight, Cambridge, 1935.

# РАДУГИ, ГАЛО И ВЕНЦЫ

## РАДУГА

Простое наблюдение служит введением в изучение радуги: то, что мы видим происходящим в отдельной капле воды, наблюдается также в миллионах дождевых капель и служит причиной сияющей цветной дуги.

### 134. Интерференционные явления в дождевых каплях *)

Многие из тех, кто носит очки, жалуются, что дождевые капли искажают изображение и делают его неузнаваемым. Вероятно, их можно утешить, если привлечь их внимание к великолепным интерференционным картинам, видимым по вечерам на тех же самых дождевых каплях. Все, что для этого необходимо,— это посмотреть на далекий источник света, например на уличный фонарь. Дождевая капля, случайно оказавшаяся точно перед зрачком, превращается в световое пятно с необыкновенными выступами и зубцами и каймой прекрасных цветных дифракционных колец (рис. 117, *а*).

Примечательно, что световое пятно остается на том же месте, даже если очковое стекло подвигать вправо и влево. Другая замечательная черта состоит в том, что общая форма и рисунок светового пятна кажутся на первый взгляд не связанными с формой дождевой капли. Объяснение несложно. Будем рассматривать глаз как маленький телескоп, создающий изображение далекого источника света, а каплю воды как группу призм, расположенных перед объективом телескопа. Тогда очевидно, что каждая маленькая призма, независимо от ее положения на очковом стекле, отклоняет группу лучей в сторону (предполагается, что они попадают в отверстие объектива); форма пятна будет зависеть, однако, от величины преломляющего угла и ориентации каждой маленькой призмы. Капля воды,

---

*) A. P o p p e, Pogg. Ann. **95**, 481, 1855; L a r m o r, Proc. Cambr. Phil. Soc. **7**, 131, 1891; B o u a s s e, Diffraction, стр. 415 и дальше.

удлиненная в вертикальном направлении, действительно дает горизонтальную полосу света.

Остаются еще дифракционные кольца. Они не существовали бы, если бы водяная капля была правильной линзой и создавала изображение источника света в виде точки. В этом случае все части волнового фронта, поскольку они покинули источник света одновременно, достигнут изображения в одной и той же фазе. Но поверхность капли искривлена неравномерно, и преломленные лучи не попадут в фокус, а будут касательными каустики (рис. 117, *б*). В этом случае в точке

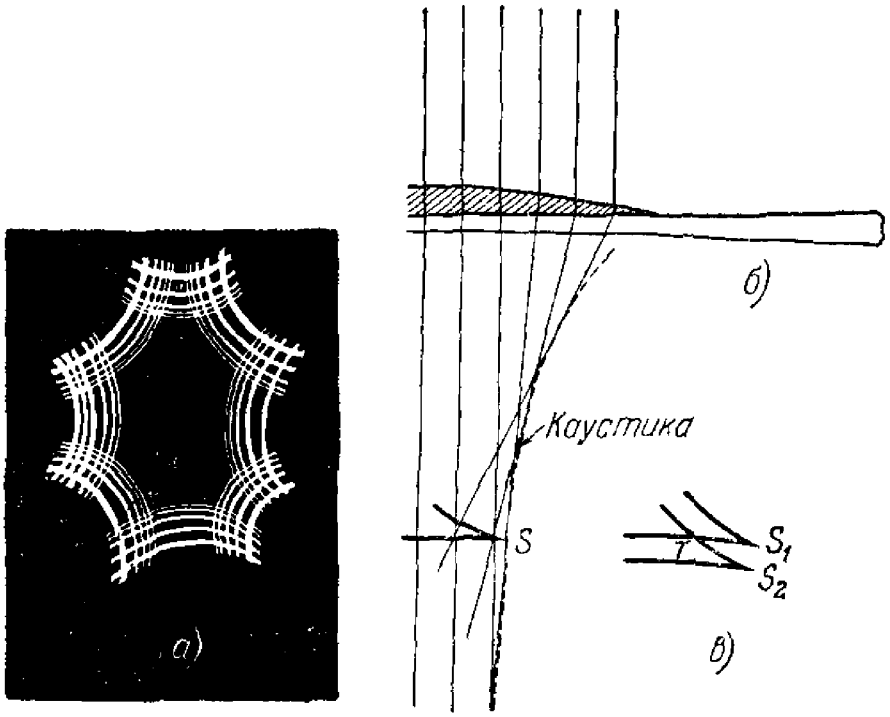



Рис. 117. Дифракция световых лучей в дождевой капле на очковом стекле. *а*) Интерференционная картина; *б*) путь световых лучей; пунктир — огибающая (каустика), жирная линия — волновые поверхности, пересекающиеся в точке *S*. *в*) Два последовательных волновых фронта, проходящих через точку *T*.

близ каустики всегда найдутся два световых луча, прошедших путь разной оптической длины, и возникнет интерференция. Начертив волновые поверхности, найдем точку возврата, где образуется «рог»: через точку *T* всегда проходят два волновых фронта с определенной разностью фаз (рис. 117,*в*).

Расстояние между темными кольцами, измеряемое от определенной точки, дается формулой $\sqrt[3]{(2m+1)^2}$, где $m = 1, 3, 5...$ Таким образом, отношение этих расстояний равно 2,1; 3,7; 5,0; 6,1 и т. д.

Наряду с изогнутыми полосами, которые окаймляют каплю, можно видеть также более слабо очерченные колечки вокруг каждой пылинки, лежащей на поверхности самой капли или на стекле очков. Чем старательнее вы протираете стекла, тем меньше будет наблюдаться этих колечек.

Стоит затратить труд, чтобы изучить все эти особенности.

## 135. Как образуется радуга

*Мое сердце бьется, когда я вижу*
*Радугу в небесах.*

*(Вудсворт)*

Лето, полдень, томительно жарко. Темные облака на западе — собирается гроза. Черная арка туч быстро растет. На некотором расстоянии за ней небо кажется почти чистым; у переднего края тучи окаймлены перистыми облаками с красивыми поперечными полосами. Тучи покрывают все небо и проходят над нами, вызывая трепет раскатами грома. Внезапно разражается ливень, становится холоднее. Солнце, уже низко у горизонта, показывается снова, и на фоне уходящей на восток грозы появляется широкая дуга многоцветной радуги.

Когда бы радуга ни возникала, она всегда образуется игрой света на каплях воды. Обычно это дождевые капли, изредка — мелкие капли тумана. На самых мелких каплях,— таких, из которых состоят облака, радуга не видна. Таким образом, если вы когда-нибудь услышите, что кто-то видел радугу в падающем снеге или на совершенно чистом небе, будьте уверены, что снег был полурастаявшим или радуга была видна на том моросящем дожде, который временами идет без всяких туч. Попробуйте провести эти интересные наблюдения сами! Капли, на которых возникает радуга, обычно находятся от нас на расстоянии от одного до двух километров (фотография XIV). Однажды я отчетливо видел радугу на фоне дерева, находившегося в 20 *м* от меня: сама радуга возникла, следовательно, еще ближе. Известны случаи, когда радуга была видна на расстоянии 3—4 *м* *)!

По старому английскому поверью, у подножия каждой радуги можно найти горшок с золотом. Еще и теперь встречаются люди, воображающие, что они действительно могут добраться к подножью радуги и что там виден особый мерцающий свет. Совершенно очевидно, что радуга не находится в каком-либо определенном месте, подобно реальной вещи; она — не что иное, как свет, приходящий по определенному направлению.

По народному поверью, радуга утром предвещает дождь, вечером — хорошую погоду. В этом утверждении не слишком много правды. Радуга всегда связана с дождем и в большинстве случаев дождь идет также и после радуги **).

Попытайтесь сфотографировать радугу на орто- или панхроматической пленке с желтым светофильтром; выдержка $^1/_{10}$ *сек*, диафрагма $F$ : 16.

---

*) Nature **87**, 314, 1913.
**) G. Schinder, Meteor. Rundsch; **1**, 435, 1948.

## 136. Описание радуги

*Рубенсова радуга .. была тускло голубой, темнее, чем небо в пейзаже, освещенном со стороны радуги. Рубенс повинен не в том, что он был не знаком с оптикой, но в том, что он никогда тщательно не всматривался в радугу.*

*(Р е с к и н, Орлиное гнездо)*

Радуга представляет собой часть окружности. Первое, что нужно попытаться сделать,— это найти, где лежит центр этой окружности, т. е. направление, в котором мы видим центральную точку. Мы немедленно замечаем, что эта центральная точка $T$ лежит под горизонтом и легко находим, что в нее направлено продолжение прямой, проходящей через Солнце и глаз наблюдателя $O$. Эта линия — как бы ось, на которую радуга надета подобно колесу (рис. 118). Лучи, идущие от радуги к глазу, образуют коническую поверхность; каждый из них идет под углом в 42° к оси (это половина угла при вершине конуса).

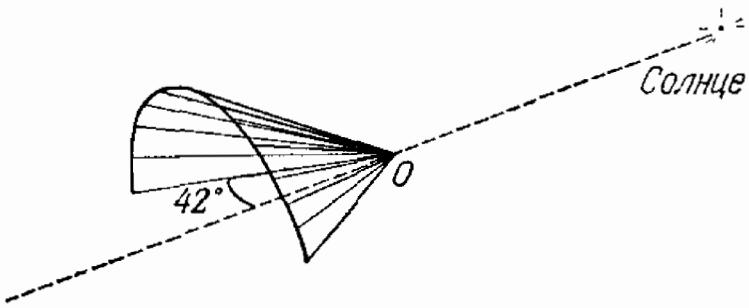



Рис. 118. Относительное расположение радуги и Солнца.

Чем ниже опускается Солнце, тем выше поднимается противосолнечная точка, а следовательно, и сама радуга все большей дугой поднимается над горизонтом, пока при заходе Солнца она не становится полукруглой. С другой стороны, если высота Солнца больше 42°, радуга исчезает под горизонтом: в этом причина того, что в наших широтах никто не видел радугу летом близ полудня.

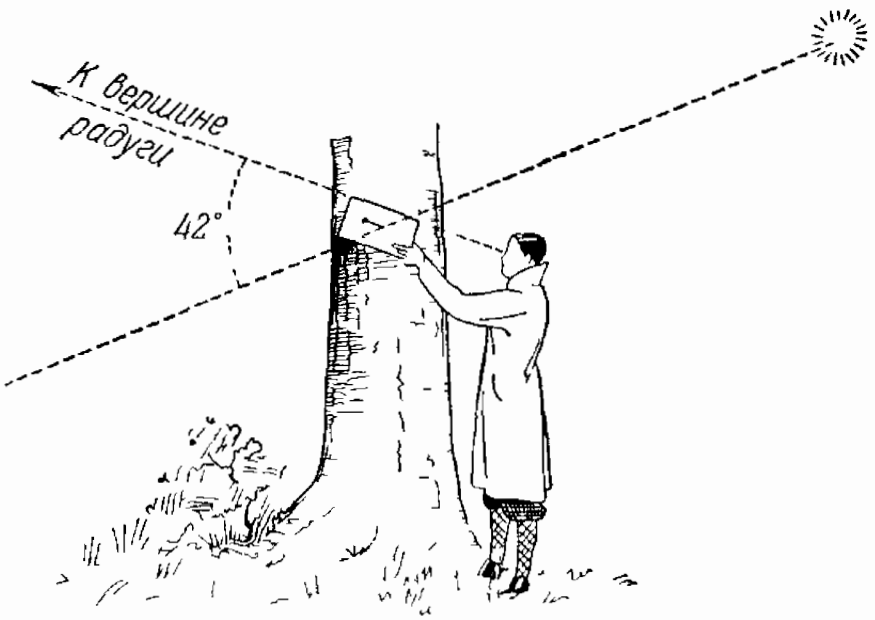



Рис. 119. Измерение углового расстояния радуги от противосолнечной точки.

Приколов булавкой к дереву открытку, повернем ее так, чтобы один из углов открытки указывал на вершину радуги. Тень булавки покажет тогда направление линии, соединяющей Солнце и наблюдателя, так что можно будет сразу определить угловое расстояние радуги от противосолнечной точки (рис. 119).

Для определения высоты вершины радуги $h$ над горизонтом и расстояния $2a$ между двумя концами дуги (рис. 120) можно также применить один из методов § 265, заметив время наблюдений Вычислив затем высоту Солнца, которая равна углу $H$ противосолнечной точки $T$ под горизонтом, получим три выражения для определения углового радиуса (из них следует взять среднее), а именно:

$$r = H + h;$$

$$\cos r = \cos a \cos H,$$

$$\operatorname{tg} r = \frac{1 - \cos a \cos h}{\cos a \sin h}.$$

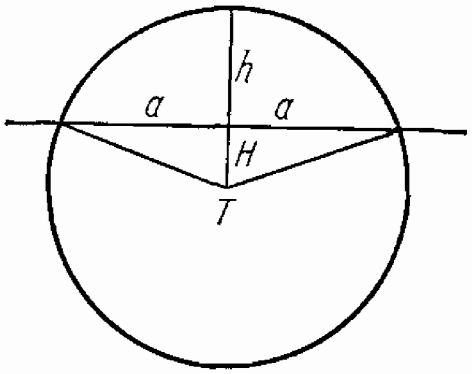



Рис. 120. Определение высоты вершины радуги над горизонтом.

Собственно говоря, радуга представляет собой полную окружность. Мы не можем проследить ее за горизонтом только потому, что мы не видим дождевых капель, падающих под нами. Установлено, что с самолета или воздушного шара можно видеть полную окружность с тенью наблюдателя в ее центре *). Это величественное зрелище действительно наблюдалось **).

Вторую радугу над первой многие считают явлением необычным. В действительности, однако, она наблюдается почти всегда, хотя и более слабой, чем первая. Вторая радуга концентрична с первой и также имеет в центре противосолнечную точку, однако ее лучи образуют с осью, проходящей через Солнце и глаз, угол в 51°.

«Семь цветов радуги» существуют лишь в воображении. Это — риторический оборот, живущий так долго потому, что мы редко видим вещи такими, каковы они в действительности. На самом деле цвета радуги постепенно переходят один в другой, и лишь глаз непроизвольно объединяет их в группы. Установлено, что радуги сильно отличаются одна от другой; даже одна и та же радуга может измениться за время ее наблюдения и вершина ее может отличаться от нижних частей. Прежде всего обнаружены большие различия в общей ширине цветной полосы (в угловой мере, см. Приложение, § 265). Далее, хотя порядок цветов всегда один и тот же: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый — относительная ширина полос различных цветов и их яркость меняются самым произвольным образом. По моему впечатлению, разные наблюдатели не всегда описывают одинаково одну и ту же радугу. Поэтому, чтобы быть уверенным в различии радуг, следует либо сравнивать описания нескольких наблюдателей, либо заранее установить, совпадают ли впечатления двух наблюдателей.

Такое непредвзятое описание цветов радуги позволяет установить тот замечательный факт, что внутри фиолетовой дуги часто видимы также несколько «вторичных дуг». Как правило, они видны лучше

*) Physica **11**, 288, 1931.

**) C. Flammarion, L'Atmosphère, 1888, p. 214.

всего там, где радуга всего ярче — близ ее наиболее высокой точки. Обычно в них чередуются розовый и зеленый цвета. Их название ошибочно, так как хотя эти дуги и слабее, они образуют столь же значительную часть радуги, как и «обычные» цвета. Эти вторичные дуги часто быстро меняются по интенсивности и ширине, что служит указанием на изменение размеров капель (§ 139).

Порядок цветов во второй радуге обратен порядку в первой; они обращены друг к другу красными полосами. Вторая радуга очень редко бывает настолько ярка, что становятся видимыми ее вторичные (дополнительные) дуги: они располагаются за фиолетовой полосой, т. е. за наружным краем второй радуги *).

Как средь прозрачных облачных пелен
Над луком лук соцветный и сокружный...
. . . . . .
И образован внутренним наружный...

(Данте, Рай, Песнь XII)

## 137. Близкие к глазу радуги

Наблюдая игру солнечных лучей в мелких водяных брызгах над фонтанами и водопадами, мы можем непосредственно видеть, как возникает радуга в массе капель воды. Вдоль борта парохода, там, где волны сбиваются в пену брызг, нередко можно видеть сопровождающую корабль радугу, иногда сильную, иногда слабую, в зависимости от плотности и толщины облака водяных капель. Особенно удобно наблюдать это явление, когда курс корабля направлен к Солнцу.

Существует несколько простых методов для того, чтобы получить в саду «дождь», в котором Солнце создает радугу: а) садовый шланг; б) аппарат Тиндаля **), в котором струя воды под давлением направляется на круглый металлический диск и разбрызгивается на мелкие капли, или в) пульверизатор Анголика ***) (рис. 121); в последнем случае все, что требуется,— это сильно дуть в трубку *a*. Величину капель можно регулировать, передвигая на несколько миллиметров вверх или вниз узкую трубку *bcd* внутри широкой трубки *ef*, что достигается смещением пробкового круга *g*; важную роль играет также величина выходного отверстия *u*. Воду можно добавлять через трубку *a*, не открывая аппарата. Мои собственные опыты с этим маленьким прибором были весьма удовлетворительны.

---

*) Наблюдались Брюстером в 1828 г.
**) Phil. Mag. **17**, 61, 1883
***) Zs. phys. chem. Unterr. **4**, 275, 1891.

Крошечные капли пульверизатора, используемого для оранжерейных растений, настолько малы, что обычную радугу увидеть в них невозможно; видна только белая радуга с голубым и желтым краями (ср. § 144). Только кое-где случайно возникают большие капли и временами видна обычная радуга. При всех условиях радуга видна под углом в 42° от противосолнечной точки и преимущественно на темном фоне.

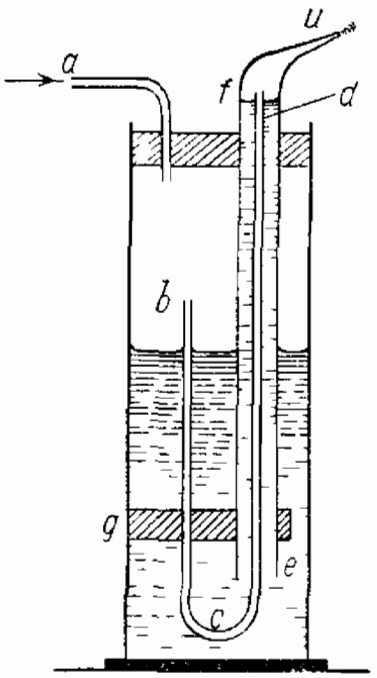


Рис. 121. Пульверизатор Антолика.

Подобные эксперименты дают превосходный материал для наблюдений. Если под «линией горизонта» есть достаточное число водяных капель, можно наблюдать радугу в виде замкнутой окружности. Если мы передвигаемся, радуга передвигается вместе с нами; она — не вещь, и мы видим ее не на определенном месте, а в определенном направлении; можно сказать, что радуга ведет себя как нечто бесконечно далекое, такое, что движется вместе с нами подобно Луне.

Если стоять очень близко к облаку капель, например при поливке из шланга, можно видеть две пересекающиеся радуги. Отчего это происходит? Попробуйте закрывать попеременно глаза и вам покажется, что каждый глаз видит свою собственную радугу (это следует также из того, что радуга перемещается вместе с нами). Нередко превосходно видна вторая радуга и дополнительные дуги. Если меняется направление струи или радуга видна на другом участке брызг, изменяется и яркость цветов радуги: причина — в изменении размеров капель.

Наклейте волокно искусственного шелка на кусочек бумаги, вырезанной в виде буквы U, и нанесите на волокно маленькую капельку слюны. Теперь поднесите капельку близко к глазу и посмотрите на темный фон. Вы увидите дождевую радугу с прекрасными вторичными дугами. Такой же опыт можно провести с каплей росы на паутине.

## 138. Декартова теория радуги

Чтобы исследовать путь света в водяной капле, наполним колбу водой и поместим ее на солнце (рис. 122, *а*). На экране *AB*, снабженном круглым отверстием (несколько бо́льшим, чем колба), возникнет тусклая радуга *R*. Она имеет форму замкнутой окружности с угловым радиусом около 42° и с красной полосой снаружи, как и в настоящей радуге.

Опыт может быть проведен с равным успехом с обыкновенным стаканом, который должен быть, однако, более или менее цилиндрическим. Опыт следует ставить утром или вечером, когда Солнце низко. Изображение теперь уже не будет окружностью, а будет состоять из цветных полос.

Если поместить в $S$ небольшой экран, прикрепленный к нитке, то в нижней части радуги мы увидим тень (рис. 122, *б*). Если приложить к колбе, где-либо около $V$ мокрый палец, мы увидим в соответствующем месте в нижней части радуги более темное пятно.

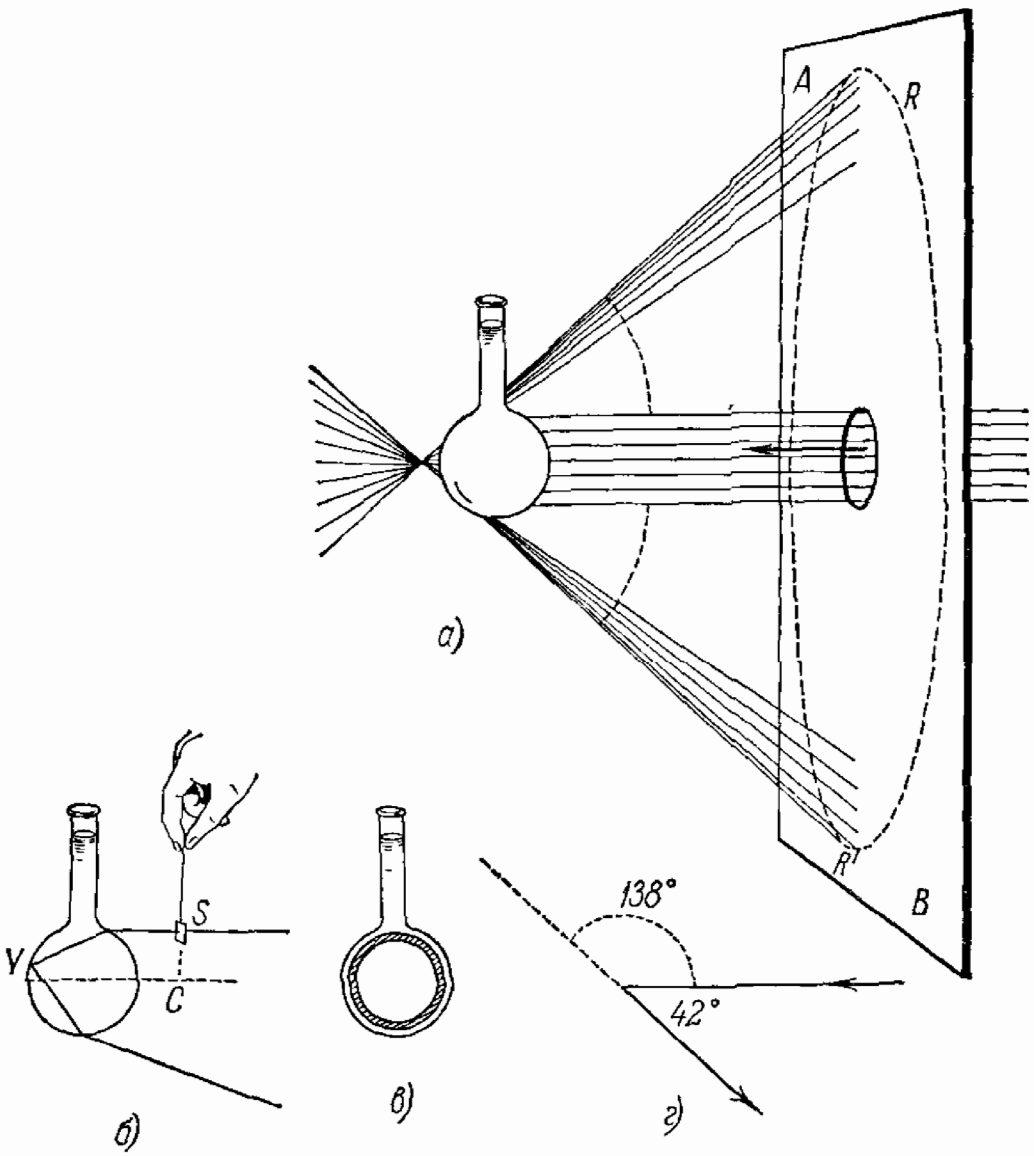



Рис. 122. Воспроизведение радуги при помощи колбы, наполненной водой.

Можно также использовать в качестве источника света свечку, которая помещается на расстоянии 1 *м* от стакана, наполненного водой. Свет свечки оказывается слишком слабым для того, чтобы уловить его на экране, но если посмотреть на стакан под углом 150° к направлению на свечу и постепенно сместить глаз до угла 138°, то можно увидеть две световые полоски, приближающиеся друг к другу, которые встретившись, излучают цвета радуги, а потом исчезают. Направление этих замеченных в последний момент лучей

можно отметить при помощи булавок, наколотых на столе, и потом измерить угол отклонения.

Таким образом, радуга образуется лучами, падающими на расстоянии $SC$ от центральной линии и отражается назад в капле воды в точке $V$. Если перед колбой поместить кольцо шириной в несколько миллиметров и диаметром, равным 0,86 диаметра колбы, совместив его центр с центром падающего луча, радуга вообще исчезнет (рис. 122, *в*). Рис. 123 показывает точный ход лучей, вычисленный по законам отражения и преломления. Видно, как

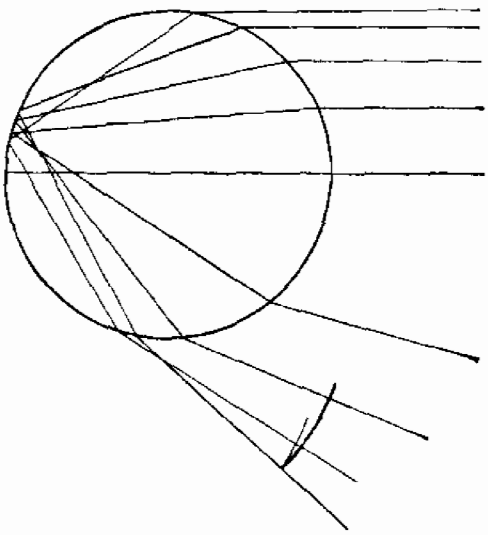


Рис. 123. Пути световых лучей в капле воды, показывающие, как образуется радуга. Жирная линия — фронт волны.

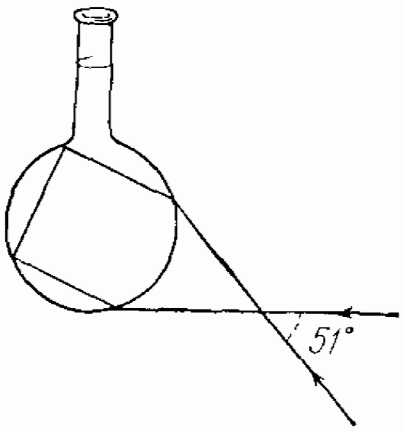



Рис. 124. Возникновение второй радуги.

световые лучи, падающие на водяную каплю, выходят из нее под различными углами, в зависимости от места, где они попадают в каплю. Один из этих лучей отклоняется меньше других, а именно на 138°, иными словами, он образует с осью угол в 180°—138°= =42°. Выходящие лучи имеют различные направления; только испытывающие минимальное отклонение практически параллельны друг другу и поэтому достигают нашего глаза с наибольшей «плотностью».

В хорошо затемненной комнате на экране можно видеть и вторую радугу, образующую с осью угол в 51°, т. е. отклоненную на 180°+51°=231° от направления падающего луча (рис. 124). При помощи опытов, подобных проведенным с первой радугой, можно убедиться, что вторая радуга образуется при двойном отражении лучей. Порядок цветов в ней обратный по сравнению с первой радугой, как и в действительности.

Теперь представим себе, что каждая из капель облака, отражает, как это описано выше, значительную часть света под углом 42° и несколько меньшую под углом 51°. Все капли, видимые на угловом расстоянии 42° по отношению к приходящему от Солнца

лучу, находятся в таком положении, что они посылают свет своей первой радуги к нашему глазу, в то время как от капель, расположенных на угловом расстоянии 51° от падающего солнечного света, мы получаем дважды отраженные лучи. Таким путем и образуются первая и вторая радуги (рис 125).

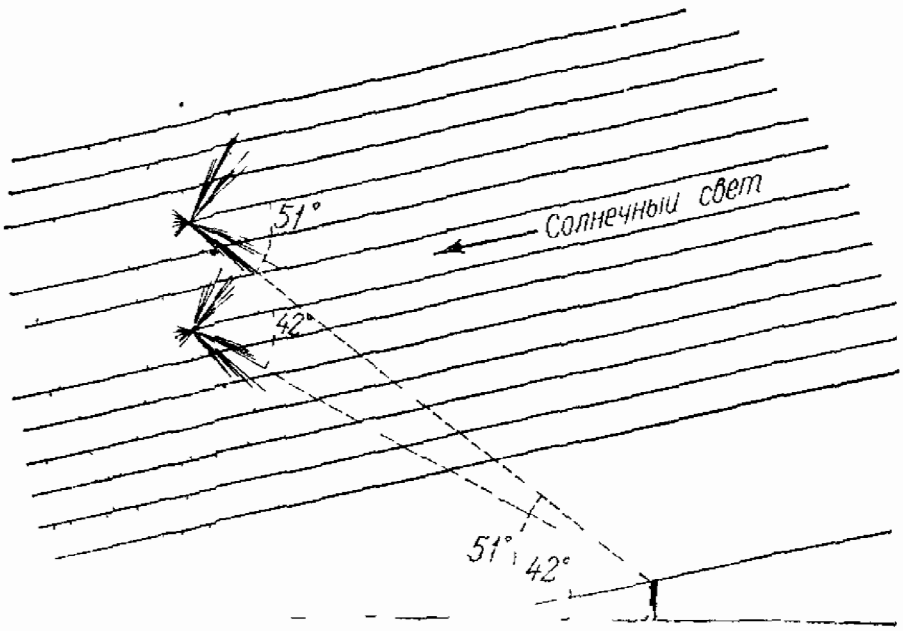



Рис 125 Солнечный свет, падающий на облако дождевых капель, создает первую и вторую радуги

## 139. Дифракционная теория радуги*)

В теории Декарта рассматриваются лишь лучи, испытывающие минимальное отклонение, как если бы существовали только они одни. В действительности, однако, существует значительное число лучей с бо́льшим отклонением, огибаемых искривленной каустикой. Это в точности те же условия, при которых возникает интерференция в дождевых каплях на очковых стеклах (§ 134). И, в частности, когда имеешь дело с очень маленькими каплями, уже нельзя ограничиться рассмотрением световых л у ч е й В этом случае необходимо исследовать волновой фронт близ каустики (рис. 123)

Согласно принципу Гюйгенса точки волнового фронта следует рассматривать как излучающие центры, тогда проблема сводится к исследованию того, как взаимно интерферирующие колебания из различных участков волнового фронта достигают нашего глаза Это исследование, проведенное Эри и завершенное Стоксом, Мебиусом и Пернтером, приводит к знаменитому интегралу радуги

$$A = c \int_0^\infty \cos \frac{\pi}{2} (u^3 - zu)\, du$$

Здесь $A$ — амплитуда световых волн, попадающих в наш глаз, в функции угла $z$ с направлением луча, испытывающего минимальное отклонение Интеграл вычисляется при помощи разложения в ряды, наблюдаемая нами интенсивность света в направлении $z$ измеряется величиной $A^2$

Рис 126 показывает для лучей одного цвета, как из-за дифракции меняется распределение света в зависимости от угла наблюдения при переходе от больших капель (*а*) к малым (*б*) Явление по-прежнему

*) Ср Prins en Reesink, Physica **11**, 49, 1944, Buchwald, Optik Dtsch. **3**, 4, 1948, van de Hulst, Light Scattering by Small Particles, 1957.

определяется в основном лучами, испытывающими минимальное отклонение ($z=0$), однако наблюдается еще и несколько меньших максимумов Подобные кривые нужно чертить отдельно для различных цветов, располагая их по длинам волн Для каждого данного угла мы получаем таким образом некоторую смесь, следовательно, радуга никогда не состоит из отдельных чистых цветов Так как первый и наиболее сильный максимум каждого цвета играет главную роль и эти первые максимумы постепенно смещаются с увеличением длины волны, то мы наблюдаем цвета радуги в сущности так же, как это следует из элементарной теории Изменения, вызываемые дифракцией, состоят в том, что цвета могут оказаться несколько отличными в зависимости от величины капель и что внутри радуги появляются вторичные (дополнительные) дуги Наконец, следует иметь в виду, что Солнце не является точкой, поскольку солнечные лучи заполняют угол около полуградуса, цвета радуги оказываются несколько размытыми. Дифракционная теория позволяет по виду радуги сразу приближенно оценить размеры капель, на которых она возникает. Главные характеристики таковы:

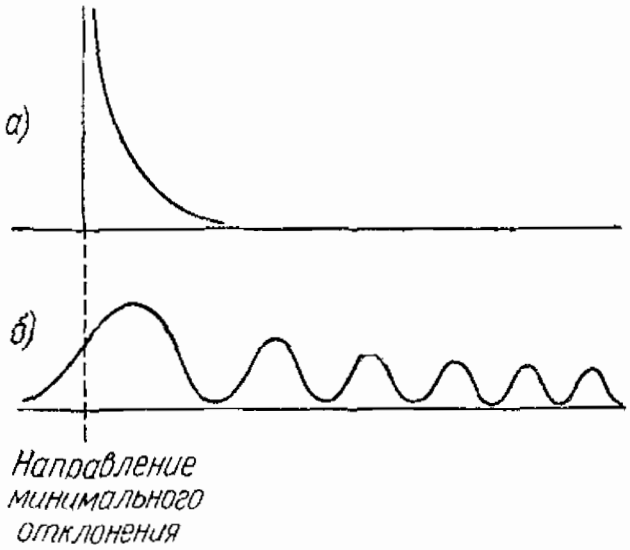



Рис 126 Распределение света в пучке лучей, выходящих из капли воды
*а*) согласно простой теории Декарта,
*б*) согласно дифракционной теории

| Диаметр капель | |
|---|---|
| 1—2 *мм* | Очень яркий фиолетовый и яркий зеленый цвета, есть красная дуга, голубая едва заметна Дополнительные дуги многочисленны (до пяти), фиолетово розовые вперемежку с зелеными, и непосредственно примыкают к первой радуге |
| 0,50 *мм* | Красный цвет значительно слабее Несколько фиолетово-розовых и зеленых дополнительных дуг сменяют друг друга |
| 0,20—0,30 *мм* | Красного цвета больше нет, в остальном дуга широка и хорошо развита Дополнительные дуги становятся все более и более желтыми. Если между дополнительными дугами возникает просвет, диаметр капель составляет 0,20 *мм*, если появляется просвет между первой радугой и первой дополнительной дугой, диаметр капель меньше 0,20 *мм* |
| 0,08—0,10 *мм* | Радуга шире и бледнее Ярок только фиолетовый цвет Первая дополнительная дуга отделена от первой радуги довольно широким промежутком и имеет отчетливый белесый оттенок |
| 0,06 *мм* | Первая радуга содержит отдельные белые полосы |
| 0,05 *мм* | Белая радуга (ср. § 144) |

## 140. Небо близ радуги *)

Внимательный наблюдатель заметит, что небо между обеими радугами темнее, чем снаружи. Конечно, яркость фона облаков меняется, но все же это потемнение выявляется совершенно отчетливо (фотография XIV)**). Объяснение заключается в том, что, помимо лучей, испытывающих минимальное отклонение, каждая капля отражает

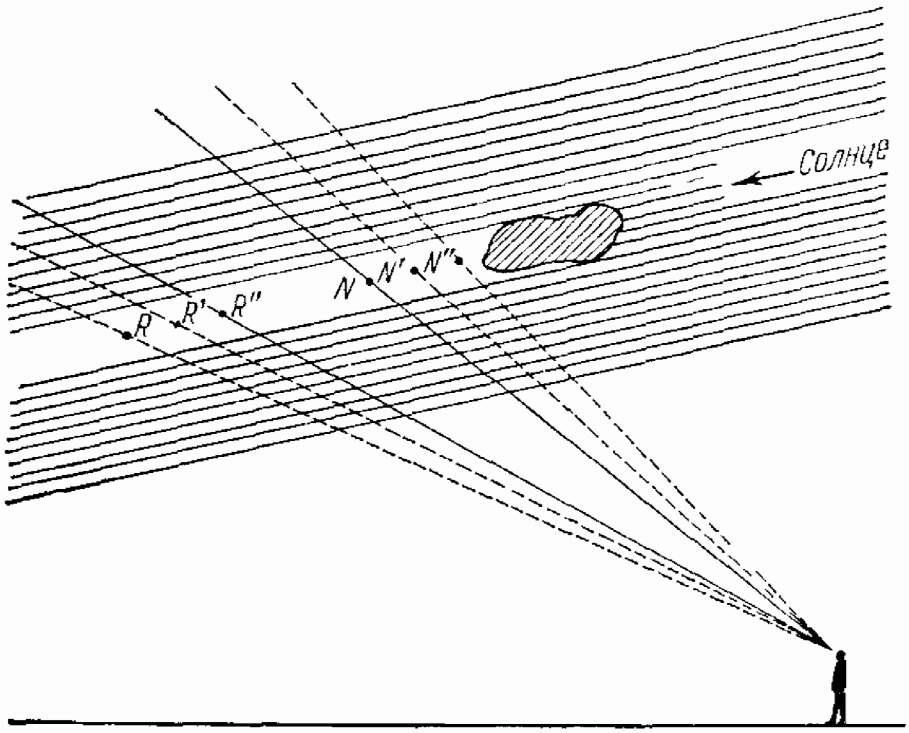



Рис. 127. Из-за облака между Солнцем и дождевыми каплями на небе образуются расходящиеся полосы.

лучи и в других направлениях, сильнее отклоняющихся от направления падения. Это показано на рис. 125. Во второй радуге лучи отклоняются в сторону, противоположную отклонению в первой.

Наблюдатель увидит, таким образом, диффузное сияние солнечного света внутри первой радуги, возникающее из-за солнечных лучей, испытавших одно отражение и отклонившихся более, чем на 138°; он увидит также диффузное сияние солнечного света за второй радугой (благодаря дважды отраженным лучам, отклонившимся больше, чем на 231° и составляющим с осью угол больше 51°).

Воздух в промежутке между двумя радугами освещен только общим светом неба. Чудесный контраст можно наблюдать, когда радуга появляется при заходе Солнца: внутри огромного полукруга воздух кажется розово-желтым, как само заходящее Солнце, вне его он синевато-серый, цвета неба.

Иногда в диффузном сиянии внутри первой и вне второй радуг видны радиальные полосы, несколько отличающиеся по цвету ***).

*) Nature **109**, 309, 1922

**) См., например, в Русском музее в Ленинграде картину Саврасова «Радуга».

***) S. Thomson, Nature **18**, 441, 1878.

Они аналогичны иззаоблачному сиянию и лучам на движущейся воде. Это явление легко объяснить, если предположить, что между Солнцем и дождевыми каплями кое-где плавают небольшие облака (рис. 127). Капли, лежащие в тени этих облаков, не могут излучать свет по направлению к наблюдателю. Радуга, которую он видит, образована светом всех капель, располагающихся на его луче зрения. Однако излучение капель $R$ отсутствует; подобным же образом во второй радуге отсутствует свет от капель $N$; в диффузном свете отсутствует излучение от капель $R', R'', \ldots, N', N'', \ldots$, и т. д. В плоскости, проходящей через глаз наблюдателя, Солнце и облако, все явления поэтому слабее: возникает лучеподобная тень, продолжение которой проходит через точку, противоположную Солнцу, т. е. через центр радуги.

## 141. Поляризация света в радуге*)

Очень интересно попытаться увидеть радугу отраженной в стекле — не в посеребренном зеркале, которое не подходит для этой цели, а в обычном куске стекла, зачерненном или покрытом с задней

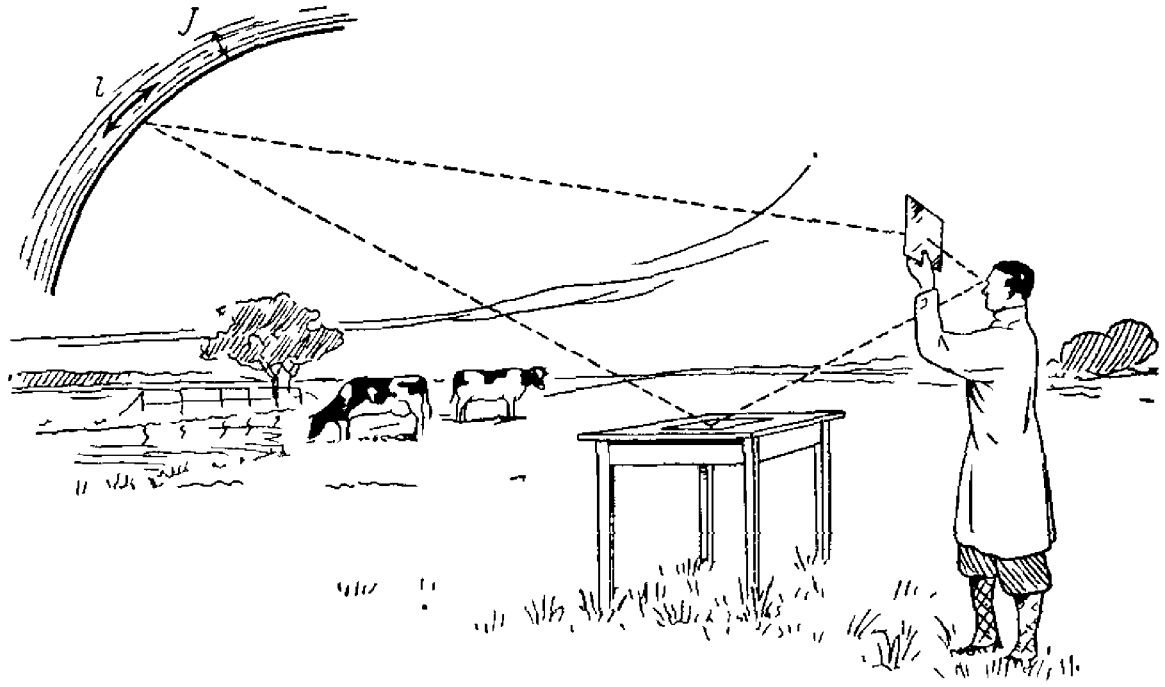



Рис. 128. Как наблюдать поляризацию света радуги.

стороны черной бумагой. Его следует держать близко к глазу и таким образом, чтобы взгляд падал на него под большим углом (скажем, около 60°) к нормали. Стекло можно держать горизонтально или вертикально, как на рис. 128. Посмотрев на вершину радуги, мы увидим, что в горизонтальном стекле отражение очень ясное и яркое, в то время как в вертикальном отражение радуги настолько слабо,

*) F. Rinne, Naturwiss. **14**, 1283, 1936.

что почти неразличимо. Это показывает, что в разных направлениях, перпендикулярных к направлению распространения, свет радуги имеет различные свойства, т. е. что он «поляризован».

Есть гораздо более легкий путь для выполнения подобных наблюдений, а именно наблюдения через призму Николя; это — маленький прибор, помогающий различить, поляризован ли свет. Можно также использовать пленку поляроида, который сейчас все больше используется для солнечных очков и в фотографии *). Николь вращают вокруг его оси; при одном положении радуга очень ярка, при другом — очень слаба. Мы можем представлять себе сложный свет, состоящим из света с колебаниями в определенном направлении $i$ и из света с колебаниями в направлении $j$, перпендикулярном к $i$. В первой радуге отношение интенсивностей $i : j$ составляет 21 : 1, т. е. поляризация почти полная. Во второй радуге она не столь сильна, хотя совершенно отчетлива: отношение интенсивностей 8 : 1. Оба результата согласуются с теорией.

## 142. Действие молнии на радугу

Замечательное наблюдение сделал Лейн **). При каждом грозовом разряде границы между цветами в радуге исчезали. Изменения были особенно заметными во вторичных дугах: промежуток между фиолетовой и первой дополнительной дугой совершенно исчезал, а желтая становилась ярче. Казалось, что вся радуга вибрирует. В соответствии с таблицей § 139, эти изменения указывают на рост величины капель.

Этот оптический эффект возникал не одновременно с молнией, но на несколько секунд позже, одновременно с громом. Можно предположить, что вследствие колебаний воздуха капли стремились слиться друг с другом, однако эта тенденция настолько незначительна, что заметить ее кажется невероятным. Возможно также, что электрический разряд вызывает изменение поверхностного натяжения капель, так что они легче сливаются друг с другом, но тогда равенство промежутка времени, необходимого для такого изменения, и промежутка времени между молнией и громом нужно считать случайным.

## 143. Красная радуга

В последние пять или десять минут перед заходом Солнца все цвета радуги, кроме красного, начинают исчезать и, наконец, остается только одна красная дуга. Иногда она чрезвычайно ярка и

*) Светофильтры с такой пленкой (поляризационные светофильтры) используются для фотографирования блестящих предметов.

**) J. Laine, Phys. Zs. **10**, 965, 1909.

остается видимой даже спустя десять минут после захода Солнца. Нижние части дуги, естественно, в это время закрыты, так что она кажется начинающейся на некоторой высоте над горизонтом. Так природа демонстрирует нам спектр солнечного света и то, как он меняется во время захода Солнца. Эти изменения вызываются атмосферным рассеянием света с более короткими длинами волн (§ 189).

## 144. Туманная или белая радуга *)

Когда капли очень малы, радуга выглядит совершенно иначе. Это особенно хорошо видно, если стоять на холме, один склон которого освещен Солнцем, а другой склон и подножье погружены в туман. Радуга кажется тогда белой полосой, вдвое более широкой, чем обычная радуга, оранжевой к внешнему краю и голубоватой — к внутреннему. С внутренней стороны часто можно видеть одну или даже две дополнительные дуги; порядок цветов в них, к нашему удивлению, обратный обычному в первой радуге (сначала зеленый, затем красный).

Эти особенности неожиданно согласуются с теоретическими вычислениями для капель радиусом 0,025 *мм* и меньше (ср. § 139). Для таких очень малых капель радиус дуги уже не будет равным 42°; он начинает уменьшаться и, поскольку «малый» здесь означает «приближающийся к длине волны света», эффект выступает для красных лучей яснее, чем для голубых. Следовательно, красная полоса в дополнительных дугах должна обладать меньшим диаметром, чем синяя, и лежать внутри.

Тот, кому посчастливилось увидеть это красивое явление, может выполнить несколько измерений для определения диаметра дуги $2\theta$ (в градусах; ср. § 265). Черное кольцо между первой радугой и первой дополнительной дугой может быть измерено наиболее точно. По полученному значению при помощи формулы

$$a = \frac{0{,}31}{(41^\circ 44' - \theta)^{3/2}}$$

можно вычислить радиус капель (в миллиметрах). (Другой путь — взять среднее значение по голубому и оранжевому краям радуги, но в этом случае числитель в формуле следует принять равным 0,18.)

Весьма удивительно, что белую радугу можно видеть даже при очень низкой температуре (—34° Ц); это означает, что капли воды в атмосфере могут быть очень сильно переохлаждены **). Она видна

*) Phil. Mag. **29**, 456, 1890; E. van Everdingen, Hemel en Dampkring **30**, 19, 1932.

**) Ch. F. Brooks, Month. Weather Rev. **53**, 49, 1925; G. C. Simpson (Month. Weather Rev. **38**, 291, 1912) отметил появление белой радуги при температуре —29°Ц.

также и тогда, когда туман настолько разрежен, что наблюдатель убежден в его отсутствии!

Белая радуга возникает почти всегда, когда ослепительный луч прожектора, расположенного сзади нас, пронизывает дымку перед нами. Даже обычный уличный фонарь часто создает белую радугу, хотя и слабую, и только на темном фоне *). Один из моих читателей заметил белую радугу при свете керосиновой лампы, а Тиндаль наблюдал ее однажды со свечой в качестве источника света. Если дымка видна на темном фоне, белую радугу можно временами видеть как полную окружность; нескольких метров между нашими глазами и землей достаточно, чтобы вызвать это явление **). В очень редких случаях наблюдается двойная белая радуга ***).

## 145. Радуга на росе или горизонтальная радуга

Осенними утрами вереск покрыт миллионами паутинок, заметных только потому, что они, усыпанные каплями росы, сверкают в солнечных лучах (§ 35).

Если посмотреть на такой вереск в определенном направлении, то можно увидеть, как он сверкает, переливаясь подобно сатину. Это и есть кусочек радуги. Иногда удается увидеть всю радугу, располагающуюся на траве, покрытой росой, только не круговую, а имеющую форму широкой гиперболы (рис. 129).

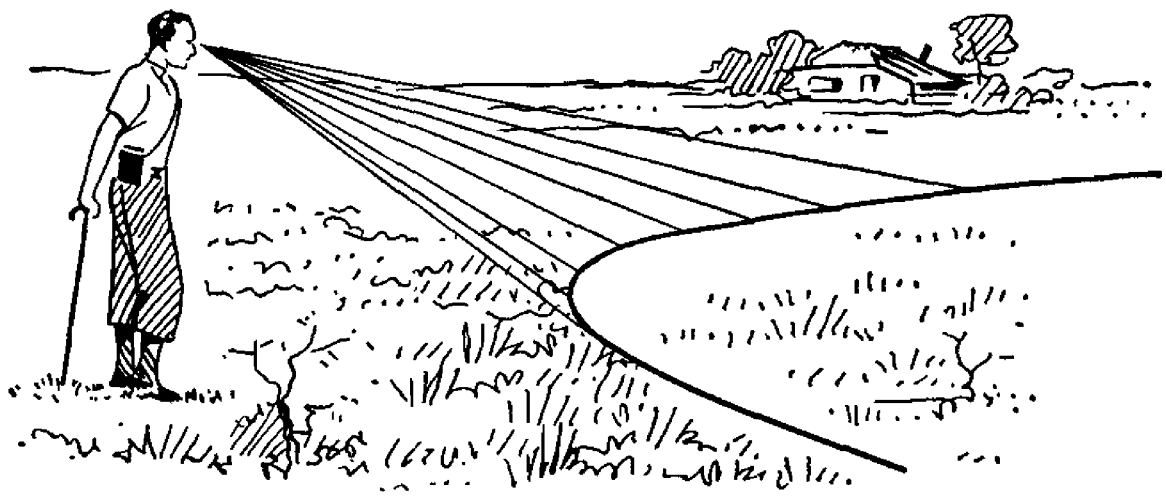


Рис. 129. Радуга на росе.

Объяснение несложно: свет попадает в наш глаз тогда, когда его луч образует с осью «Солнце — глаз» угол в 42°. Пока Солнце невысоко, этот конус пересекает поверхность Земли по гиперболе. В течение дня она превратится в эллипс, хотя такое превращение наб-

*) Meteor. Zs. **39**, 33, 324, 1922; Hemel en Dampkring **1**, 349, 1903.
**) Phil. Mag. **17**, 48, 1883; Hemel en Dampkring **1**, 349, 1903.
***) L e p p e r, Hemel en Dampkring **1**, 1903; Onweders **52**, 54, 1931.

людается очень редко. Попросив кого-нибудь помочь вам отметить и измерить кривую на Земле, вы можете убедиться, определив по времени наблюдения высоту Солнца, что кривая представляет собой гиперболу, соответствующую конусу с углом в 42° *). Проследите, как с удалением от наблюдателя увеличивается ширина окрашенной полосы. В одном случае на росе наблюдались белая радуга и дополнительные дуги **).

Радуга на росе наблюдалась также в следующих условиях: а) на пруду, покрытом ряской; на лугу; б) на пруду с маслянистой поверхностью, на которой капли росы лежат, не сливаясь с водой; такая поверхность может возникать, например, из-за дыма фабрик. В одном случае размер капель менялся от 0,1 *мм* до 0,5 *мм*; 20 капель на 1 $см^2$ создавали весьма четкую радугу ***); в) рано утром на озере или на море, когда воздух прохладен, а вода еще теплая, так что над поверхностью воды стелется легкая дымка. В этом случае обычно наблюдается не вся горизонтальная радуга, а две ее ветви; г) на замерзшей поверхности, которая, по-видимому, может быть покрыта каплями росы правильной формы. (Каким образом это возможно?) ****)

Эти наблюдения представляют интерес и с точки зрения психологии. Почему обычная радуга кажется нам круговой, а радуга на росе — гиперболической, хотя в обоих случаях световые лучи попадают в наш глаз по тем же направлениям? Это — вопрос сочетания наблюдений и ожидания. Когда мы видим радугу на росе, мы находимся под влиянием мысли, что световое явление происходит в горизонтальной плоскости, и бессознательно спрашиваем себя: какова должна быть действительная форма световой кривой на траве, чтобы мы видели явление таким, каким мы его видим? Ответ, конечно, гласит: эллипс или гипербола. «Если бы мы видели только световое явление и ничего не знали о его происхождении, нам представлялась бы только форма окружности» (Стокс). Стереоскопическая оценка расстояния до отдельных капель и скоплений капель определенно помогла бы нам локализовать радугу на росе в горизонтальной плоскости.

Об отраженной радуге на росе см. § 147.

## 146. Отраженная радуга и радуга от отраженного Солнца

Если мы видим радугу в направлении точки $A$ в облаке (рис. 130), то, наблюдая отражение пейзажа в спокойной воде, мы увидим радугу в направлении точки $B$, так что в отраженном облаке она

*) A. E. Heath, Nature **97**, 6, 1916.
**) W. J. Humfreys, J. Franklin Inst. **20**, 661, 1929.
***) Nature **43**, 416, 1891.
****) C. Maxwell, Papers, II, 160; Sitz. Acad. Wien **119**, 1057, 1910.

будет казаться расположенной ниже, чем в непосредственно видимом.

Это происходит потому, что, как уже говорилось, радуга не существует как реальный предмет, лежащий в плоскости облака,

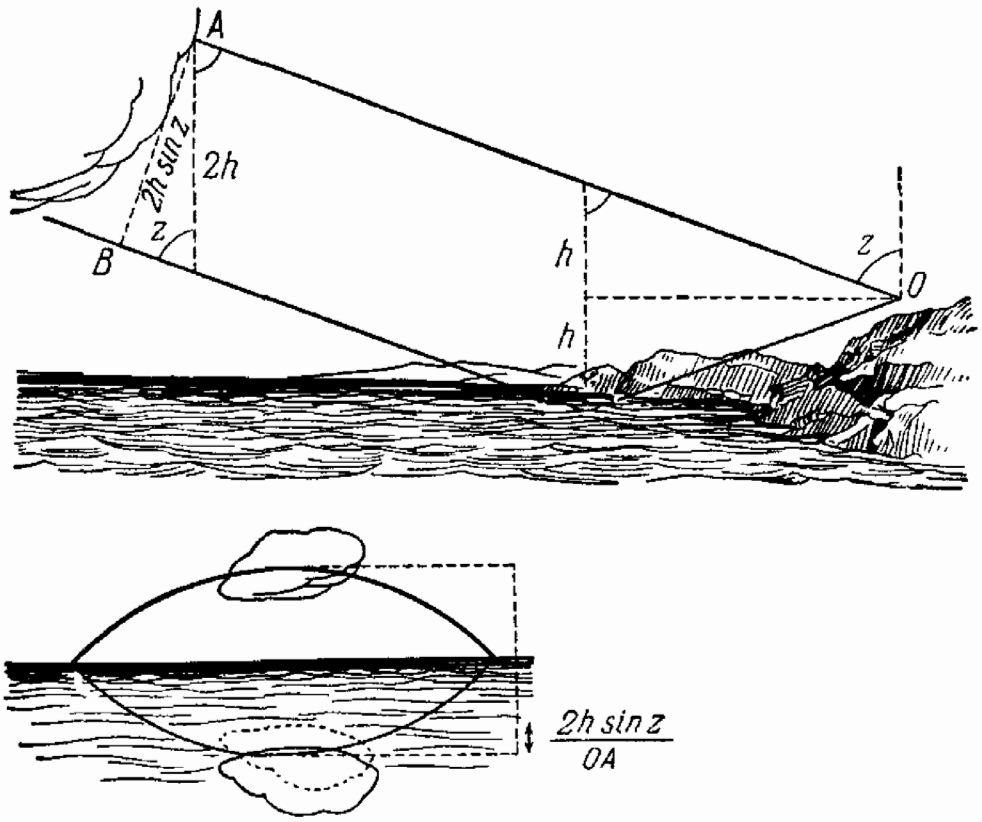



Рис. 130. Отраженная радуга.

но как бы располагается в бесконечности. Строго говоря, смещается именно облако, в то время как отражение радуги совершенно симметрично относительно горизонта. Смещение облака наблюдается легче, если мы находимся на определенной высоте $h$ над водой. Мы можем даже вычислить расстояние до облака $OA$, оценив его смещение в угловой мере, поскольку угловое смещение равно $\frac{2h \sin z}{OA}$ (рис. 130).

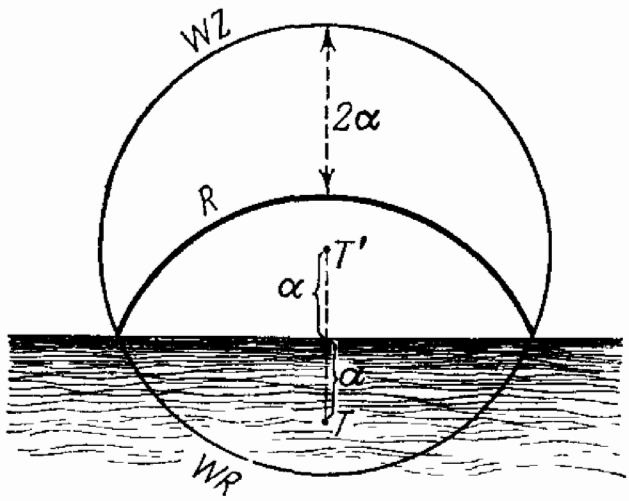



Рис. 131. $R$ — радуга, $WR$ — отраженная радуга, $WZ$ — радуга, образованная отражением Солнца.

Совершенно иной эффект возникает, однако, когда солнечные лучи отражаются прежде, чем они вызывают появление радуги. Смещенная радуга $WZ$ будет тогда казаться описанной вокруг центра $T'$, который является отражением противосолнечной точки $T$ (рис. 131). Эта дуга охватывает больше полуокружности. Расстояние между вершинами двух дуг равно углу между $T$ и $T'$, т. е. равно $2\alpha$, где $\alpha$ — высота Солнца над горизонтом. Во многих случаях смещен-

ная дуга видна лишь частично, например, только вершина или только концы. Таким образом, когда вы видите необычную радугу, прежде всего надо вспомнить о возможности такого отражения. Посмотрите, где поблизости есть большие пруды и попытайтесь согласовать неполные дуги с расположением этих прудов *). Две радуги, образующиеся благодаря отражению, дополняют друг друга до полной окружности (рис. 131). Эти явления можно различать также названиями «отраженная радуга» (*WR*) и «радуга от отражающегося Солнца» (*WZ*).

## 147. Отражение горизонтальной радуги **)

Горизонтальная радуга также может отражаться в воде, и тогда гипербола с ее превосходными цветами, образованная каплями, плавающими на поверхности воды, кажется двойной. То, что более слабая радуга возникает вследствие отражения, становится совершенно очевидным, когда удается наблюдать горизонтальную радугу на замерзшей поверхности — в этом случае вторая радуга исчезает.

Угловое расстояние между радугами равно удвоенной высоте Солнца, но поскольку в этом случае капли располагаются на поверхности самой воды, невозможно сразу установить, происходило ли отражение до или после того, как лучи света прошли сквозь каплю воды. В обоих случаях образуется гипербола (ср. рис. 132); на обоих рисунках отраженный луч поднимается на угол $42^\circ - \alpha$.

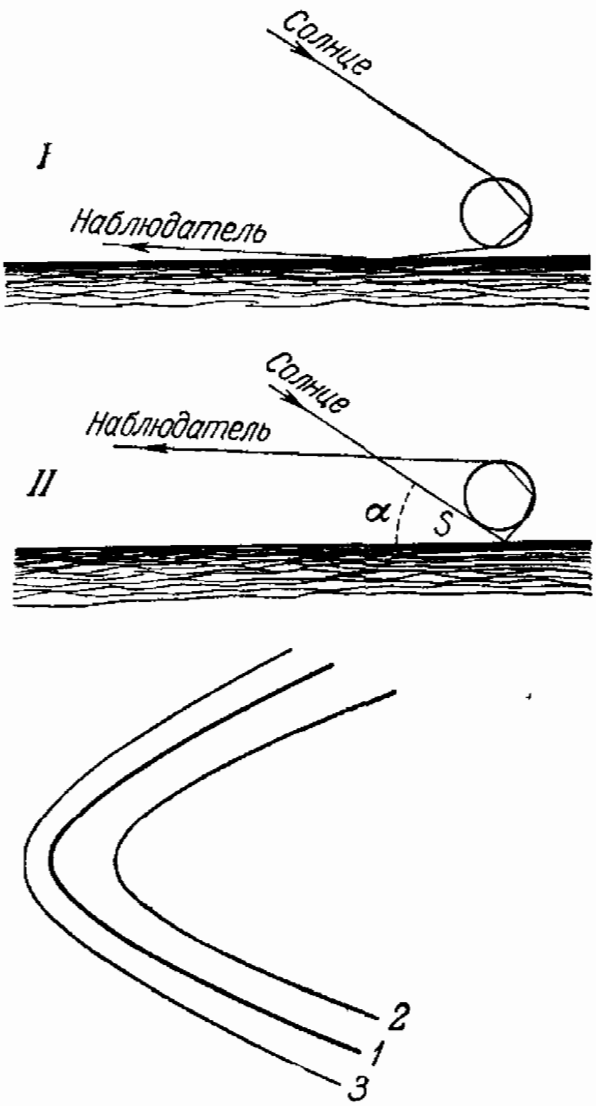



Рис. 132. Отраженные радуги на росе: *I* — отражение радуги, *II* — отражение Солнца создает радугу.
*1* — горизонтальная радуга, *2* — радуга от отраженного Солнца, *3* — вторичная радуга.

Однако, когда Солнце достаточно высоко (от 21 до 42°), существует два критерия:

а) Часть отраженной радуги близ вершины отсутствует. Это объясняется тем, что когда лучи идут по пути *II*,

*) См. Dijt, Hemel en Dampkring **29**, 14, 1931.
**) Sitz. Acad. Wien. **119**, 1057, 1910; W. J. Humphreys, J. Franklin. Inst. **207**, 661, 1929.

путь падающих лучей, прежде чем они отражаются и затем проникают в каплю, частично преграждается в $S$ самой каплей. Если лучи идут по пути $I$, эта характерная особенность радуги не возникает.

б) Если две соседние точки двух радуг наблюдать через николь, обнаружится, что направления световых колебаний очень сильно различаются и, как правило, не горизонтальны. Можно показать, что это возможно только в том случае, если отражение происходит до п р е л о м л е н и я. Возникает вопрос: почему лучи обычно сначала отражаются? Причина проста: в случае $I$ преломленные лучи проходят у самой поверхности воды и перехватываются соседними каплями.

Когда Солнце низко, световые лучи сначала проникают в каплю и затем отражаются. Вершина отраженной радуги и в этом случае заэкранирована, но степень поляризации другая. До сих пор этот случай не подвергнут тщательному изучению.

## 148. Необычные радужные явления *)

На рис. 133 приведено несколько изображений радуг необычной формы, частью обусловленных отражением от поверхности воды, однако, по моему мнению, удовлетворительное объяснение их не

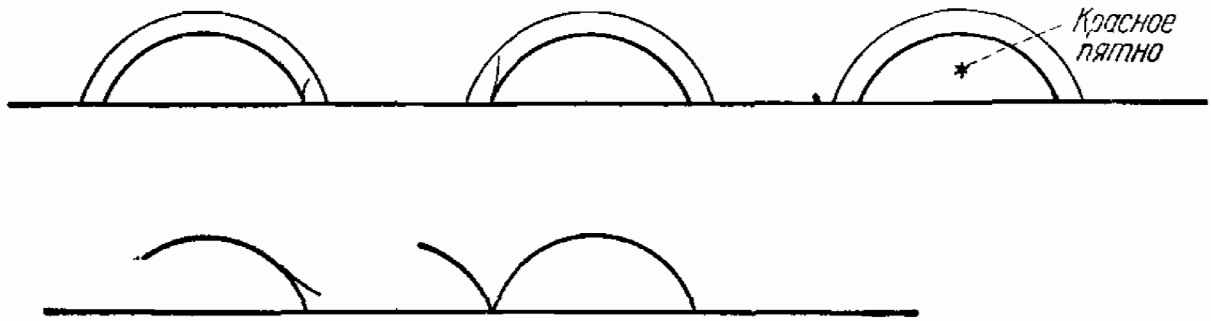



Рис. 133. Необычные радуги.

дано. Еще одна причина внимательнее отнестись к подобным явлениям! Особенно важно отметить относительное расположение красного и фиолетового краев необычной радуги. Специально понаблюдайте за вертикальным световым столбом, поднимающимся ввысь от подножья радуги, и дополнительными радугами, простирающимися над поверхностью моря.

---

*) Onweders **21**, 54, 1900; **24**, 160, 1903; **29**, 110, 1908; Hemel en Dampkring **27**, 359, 1929; Meteor. Mag. **71**, 230.

### 149. Лунная радуга

*Майер*

*Да что ж такое?*
*Ах, вижу. вижу! Радуга средь ночи!*

*Мельхталь*

*Она луной, должно быть, рождена.*

*Флюе*

*Вот редкое и чудное явленье!*
*Не всякому дано его увидеть.*

*Сева*

*Над ней другая, только побледнее...*

*(Шиллер, Вильгельм Телль, действ. II)*

Радуги вызываются Луной так же, как и Солнцем, хотя лунные радуги, естественно, очень слабы. Поэтому практически их можно видеть только при *полной* Луне; по той же причине они очень редко окрашены: слабо освещенные объекты обычно кажутся ночью бесцветными (§ 89).

Не спутайте их с гало! Радуга видна только в стороне, п р о т и в о п о л о ж н о й Луне!

Радиус лунной радуги может быть определен очень точно, если где-либо вблизи окажется яркая звезда (ср. § 151).

## ГАЛО

### 150. Общее описание явления гало *)

После нескольких дней прекрасной весенней погоды барометр падает и начинает дуть южный ветер. На западе появляются высокие облака, прозрачные и быстрые, небо постепенно становится молочно-белым и опалесцирует из-за вуали перисто-слоистых облаков. Кажется, что Солнце светит сквозь матовое стекло, его очертания становятся расплывчатыми. Пейзаж освещен особенным, неопределенным светом. Я «чувствую», что вокруг Солнца должно быть гало! И почти всегда я прав.

Вокруг Солнца мы увидим яркое кольцо с радиусом, несколько бóльшим 22°; для этого лучше всего стать в тень дома или держать руку против Солнца, чтобы не быть ослепленным (§ 177). Это велико-

*) Различные сведения о гало можно найти в книге: R. M e y e r, Die Haloerscheinungen, Hamburg, 1929. См. также M. P i n k h o f, Verh. Akad. Amsterdam **13**, № 1, 1919; E. W. W o o l a r d, Month. Weather Rev. **64**, 321, 1936; **65**, 4, 1937.

лепное зрелище! Каждому, кто видит его впервые, кольцо кажется грандиозным — а ведь это только «малое гало»; другие явления гало имеют гораздо больший масштаб. Вытяните перед собой руку с растопыренными пальцами — вы увидите, что расстояние между концом большого пальца и мизинцем приблизительно равно радиусу гало вокруг Солнца (ср. § 265).

Вы можете видеть подобный круг и около Луны. Я имею в виду не венец диаметром в несколько градусов с красным краем внутри и голубым снаружи, но такое же большое кольцо, как описанное только что гало вокруг Солнца. Лишь однажды наблюдателю так посчастливилось, что он видел в одно и то же время кольцо вокруг заходящего Солнца и кольцо вокруг восходящей полной Луны.

Такие кольца можно наблюдать чаще, чем обычно думают. Установлено, что в нашей части света опытный наблюдатель, если только он наблюдает постоянно, видит в среднем одно гало каждые четыре дня, а в апреле и мае — даже каждые два дня; наиболее наблюдательные видят гало 200 дней в году. Не кажется ли невероятным, что так много людей никогда не замечали гало вокруг Солнца?

Кроме малого гало, существуют и другие световые дуги и пятна, каждое со своим собственным именем, которые, сочетаясь, создают явление гало; на рис. 134 показано, как вырисовываются на небесной

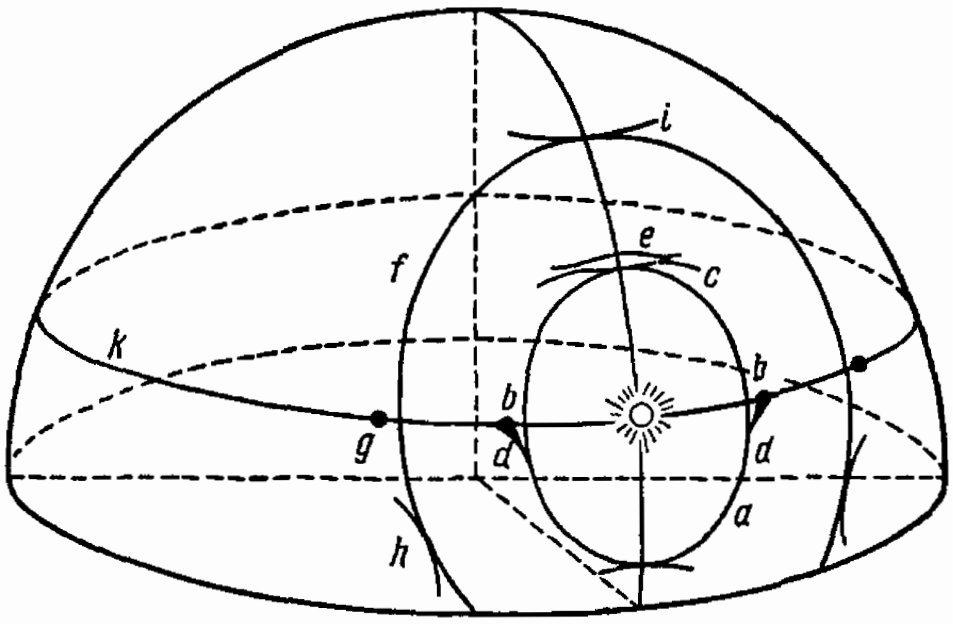



Рис. 134. Схематическое изображение некоторых наиболее важных явлений гало.

сфере наиболее важные из них. Мы кратко опишем их позже. Следует иметь в виду, что, как правило, лишь несколько из них наблюдается одновременно. Бóльшая часть этих явлений наблюдается около Солнца; около Луны они гораздо слабее, а их цвета практически неразличимы *). Вообще говоря, гало возникают в ву-

*) Ван ден Бош (C. A. van den Bosch, Natuurk. Tijdschr. voor Ned.-Indië **92**, 39, 1932) видел несколько цветных лунных гало.

али перисто-слоистых облаков, редко перистых, перисто-кучевых или высококучевых; они могут наблюдаться также в вершинах грозово-перистых, хотя не часто. Все облака, на которых возникают гало, состоят из мелких ледяных кристаллов, правильной форме которых это световое явление и обязано своей замечательной симметрией. Причина, по которой так много ледяных облаков вообще не показывают гало, состоит в том, что небольшие звездообразные снежинки и шаровые скопления кристаллов обладают слишком неправильной формой, чтобы вызвать преломление света подобно призме, и что на слишком малых кристаллах гало «замываются» дифракцией.

Фотографии гало важны для научных целей. Они используются для точных измерений углов и определения интенсивности света. Для этого, однако, фотографическая пластинка должна быть в точности перпендикулярна к оси камеры и расстояние между пластинкой и объективом должно быть точно известно. Следует использовать объектив с большим полем, желтый фильтр и панхроматические пластинки с противоореольным покрытием. Диапозитивные пластинки, вероятно, также отвечают цели. Время экспозиции с темным желтым фильтром и диафрагмой $F:12$ — около 0,01 *сек* для Солнца; для Луны при диафрагме $F:6$ экспозиция 10 *сек*. Постарайтесь, чтобы на фотографии получилась часть горизонта или, по крайней мере, деревья или силуэт дома *).

### 151. Малый круг (рис. 134, *а*; фотография XV)

Это — наиболее обычное среди всех гало. Кольцо замкнуто, кроме тех случаев, когда перисто-слоистые облака неравномерно распределены по небу; оно обычно ярче всего сверху или снизу, справа или слева, реже в промежуточных направлениях. Внутренний край достаточно резко ограничен, он окрашен в красный цвет. За ним следует желтый, неяркий, переходящий в белый. Радиус малого кольца может быть измерен при помощи одного из приемов, указанных в § 265, удобнее всего — от центра Солнца до внутреннего красного края; лучшие измерения дают 21° 50′.

Ночью радиус гало вокруг Луны может быть определен очень точно, если посчастливится наблюдать, как положение какой-либо звезды совпадает, например, с красным краем или максимумом яркости гало. Нужно только заметить название звезды (определив его, если необходимо, при помощи звездной карты) и время. Впоследствии любой астроном сможет сразу вычислить, как далеко друг от друга были два светила в этот момент (см. рис. 138).

---

*) Th. S c o n n a r d, Sky and Telescope **10**, 141, 1951; G. D. R o t h, Weather **8**, 249, 1953.

Заметьте, что небо внутри малого гало часто кажется темнее, чем вне его; всегда, когда это не выполняется, гало накладывается на диффузный свет, яркость которого постепенно убывает с удалением от Солнца. Это явление очень напоминает то, что наблюдалось у радуг (небо темнее между двумя радугами), и объясняется сходным образом.

Малое гало возникает вследствие преломления солнечного света в облаке малых ледяных кристаллов, которые, как известно, часто имеют форму шестигранных призм. В любом направлении, куда бы мы ни смотрели, парит бесчисленное множество таких призм, ориентированных всевозможным образом (рис. 135). Подобная шестигранная призма преломляет свет, как если бы она имела преломляющий угол в 60°; в соответствии с ее положением относительно падающих лучей, она будет отклонять их больше или меньше, но если путь лучей через кристалл симметричен, отклонение будет иметь минимальное значение $D$, которое определяется формулой *)

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(A+D)}{\sin \frac{1}{2} A},$$

где $n$ — показатель преломления вещества призмы, а $A$ — преломляющий угол. Для $A=60°$ и показателя преломления $n=1{,}31$ мы получаем $D=22°$, т. е. в точности радиус малого гало!

Действительно, как и в случае радуги, лучи $OB$, испытывающие минимальное отклонение, будут наиболее яркими, поскольку в этом положении направление преломленного луча очень медленно меняется при повороте призмы. Вследствие этого значительно больше ледяных кристаллов будут посылать к нашему глазу свет в этом направлении и близких к нему, чем в других направлениях. Наши расчеты проведены для желтых лучей; для красных угол наименьшего отклонения несколько меньше, для синих — несколько больше. Поэтому внутренний край гало красный, наружный — синий. Так как, однако, лучи $OC$ с отклонением, бóльшим минимального, также вносят свою долю, зеленый и синий лучи «с минимальным отклонением» смешиваются на некотором протяжении с желтым и красным, и цвета кажутся тусклыми. Небольшая часть света будет попадать в любое место вне кольца, но не внутрь него; тем самым объясняется резкость внутреннего края кольца и размытость наружного. Однако, если кристаллы не ориентированы в пространстве беспорядочно по всевозможным направлениям, а имеют определенное предпочтительное положение, вне малого кольца возникает различие в яркостях

*) Эта формула приводится в учебниках физики как формула «угла наименьшего отклонения призмы».

и появляются световые пятна и дуги, к которым мы сейчас перейдем.

Рассмотрим, однако, прежде, играет ли здесь какую-либо роль дифракция, аналогично тому как это имеет место в радуге *).

С точки зрения теории, дифракция сказываться должна: ледяной кристалл пропускает лишь узкий пучок световых лучей шириной $h$ (рис. 135) и световые волны должны дифрагировать так же, как на

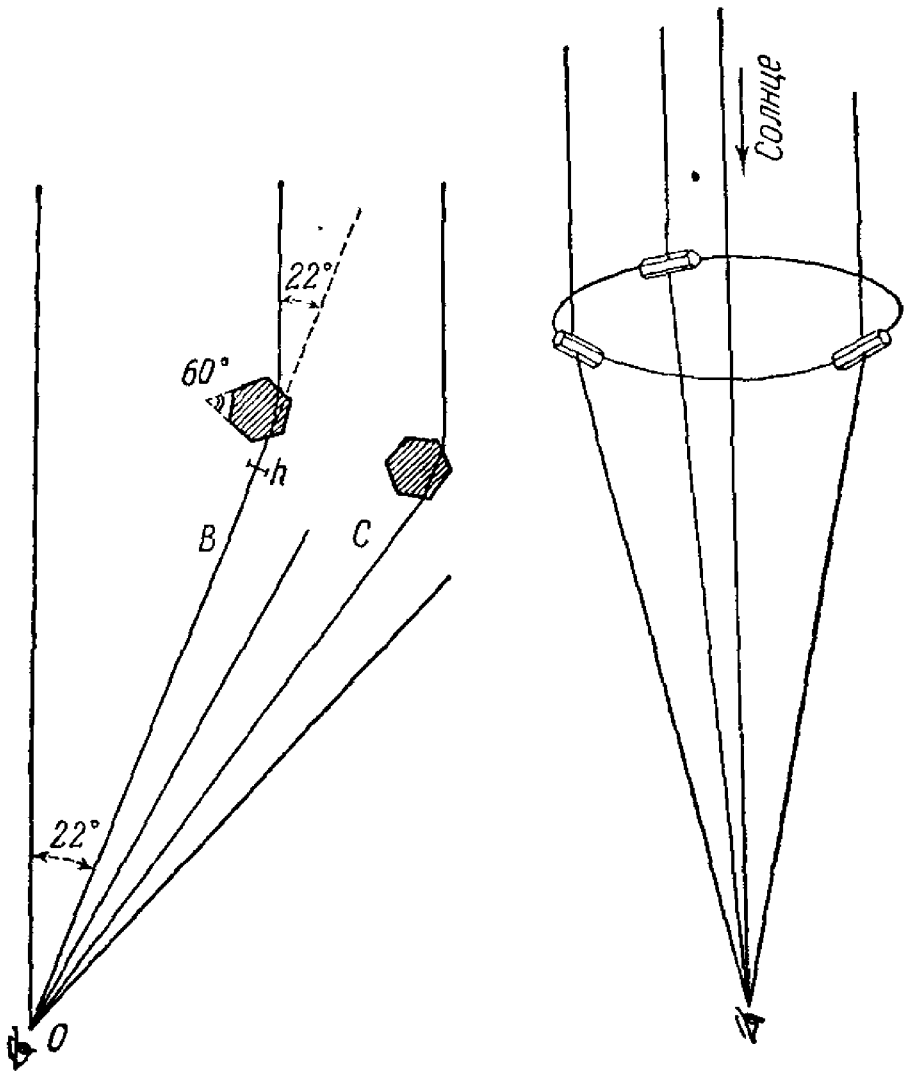



Рис. 135. Как возникает малое гало, или 22-градусный круг.

щели шириной $h$. Очень малые ледяные кристаллы должны создавать белое гало с красным краем, подобно тому, как маленькие капли воды создают белую радугу (§ 144). Более того, можно ожидать появления дополнительных (вторичных) дуг около малого круга; действительно, они иногда наблюдались. Однако вычисления показывают, что они должны быть слабее, чем у радуги, и должны возникать как вне, так и внутри круга. Внутри круга, на темном фоне, эти дуги наблюдаются легче. Имеющиеся наблюдения указывают на изменения цвета и ширины малого круга, однако подобных наблюдений

*) Visser, Versl. Acad. Amsterdam **25**, 1328, 1917; **27**, 127, 1918. Резюме в Hemel en Dampkring **15**, 17, 1917 и **16**, 35, 1918.

еще недостаточно. Часто для лучшей оценки цветов следует смотреть сквозь закопченное стекло; следует оценивать ширину полосы каждого цвета и общую ширину кольца. Называйте цвета по своему собственному независимому мнению! Всегда ли два наблюдателя называют цвета одного и того же гало одинаково? Часто смешивают красный и оранжевый, синий и фиолетовый; заметьте, как редко в гало появляется желтый цвет!

Согласно простой теории преломления, в малом круге должен практически отсутствовать голубой цвет и абсолютно отсутствовать фиолетовый; это должно быть верным также по отношению к верхней касательной дуге и к ложным солнцам (§ 157).

Однако наблюдения иногда указывают на весьма интенсивный синий цвет, особенно в верхней касательной дуге и в ложных солнцах, цветовые тона которых всегда отчетливы. Теория дифракции объясняет появление синего и фиолетового цветов (если только кристаллы имеют соответствующую величину), равно как и более интенсивную окраску касательной дуги и ложных солнц. Наконец, теория дифракции объясняет, почему цвета временами ярче в малом гало, а временами в большом: малое гало окрашено сильнее, когда грани призм, на которых происходит преломление, широки, как у кристаллов пластинчатой формы; если, однако, грани узки, как у кристаллов, имеющих форму столбика, малое гало становится бледным, а большое окрашивается ярче.

Свет малого гало поляризован *). В противоположность радуге, колебания в этом случае сильнее в направлении, перпендикулярном к кольцу, чем в параллельном ему. Это вполне понятно, так как здесь вообще отсутствует отражение и происходят лишь два преломления. Однако эффект далеко не так силен, как у радуги.

По народной примете, малое гало — предвестник дождливой погоды **), и, когда говорят «чем сильнее гало, тем скорее будет дождь», предполагают, что именно малое гало, а не венец предсказывает дождь. И действительно, перистослоистые облака часто предвещают область депрессии; дождь начинается после появления гало в среднем через 36 часов.

### 152. Паргелии или ложные солнца на малом гало (рис. 134, *b*; фотография XV)

Эти ложные солнца представляют собой два более ярких световых пятна в малом гало на той же высоте, что и Солнце. Часто случается, что видимо лишь одно из них; иногда малое гало отсутствует, в то время как паргелии отчетливо видны. Интенсивность этих ложных

*) См. Meteor. Zs. 7, 1890.
**) Quart. Journ., 1926 и др.

солнц обычно велика: они определенно красные у внутреннего края, затем красный цвет переходит в желтый, а желтый — в синевато-белый.

При внимательном наблюдении обнаруживается, что в действительности паргелии находятся несколько дальше от Солнца, чем малые гало — тем дальше, чем больше высота Солнца; когда Солнце очень высоко, расстояние может достигать нескольких градусов.

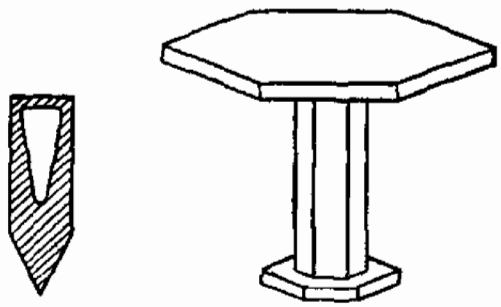


Рис. 136. Ледяные кристаллы, играющие важную роль в образовании ложных солнц.

Ложные солнца возникают, когда оси большого числа шестигранных ледяных кристаллов вертикальны. Это выполняется для медленно опускающихся «зонтиковидных» кристаллов или ледяных столбиков с углублением на одном конце (рис. 136). Данжон собственными глазами видел кристаллы, парящие в воздухе подобно маленьким зонтикам *). Другие думают, что луч проникает через боковую грань кристаллика, отражается внутри от основания и выходит через другую боковую грань.

Проходя сквозь такие призмы, световые лучи уже не идут по направлению наименьшего отклонения, поскольку они не лежат в плоскости, перпендикулярной к оси кристалла. Если высота Солнца равна $h$, то «относительное минимальное отклонение» будет определяться условием

$$\frac{\sin\frac{1}{2}(A+D')}{\sin\frac{1}{2}A}=\sqrt{\frac{n^2-\sin^2 h}{1-\sin^2 h}},$$

т. е. свет ведет себя как если бы показатель преломления кристалла для косых лучей был несколько больше (ср. § 151).

По этому уравнению легко вычислить следующую таблицу:

| Высота Солнца | Расстояние от паргелия до малого гало |
|---|---|
| 0° | 0° |
| 10 | 0°20′ |
| 20 | 1 14 |
| 30 | 2 59 |
| 40 | 5 48 |
| 50 | 10 36 |

Это очень хорошо согласуется с наблюдениями. Для высот Солнца, бо́льших 40°, измерения, к несчастью, очень трудны,

*) L'Astronomie **68**, 420, 1954. Другое объяснение см. Visser, Hemel en Dampkring **44**, 12, 1946.

поскольку явление становится неотчетливым; попытайтесь восполнить этот пробел. Заметьте, что ложное солнце часто наблюдается на «искусственных облаках», образующихся за летящим на большой высоте самолетом.

### 153. Горизонтальные касательные дуги у малого гало. Описанное гало (рис. 132, *c*)

Сравнительно яркие касательные дуги сверху и снизу малого гало при благоприятных условиях являются частями гораздо большей световой кривой — описанного гало. Эта очень редкая форма возникает, когда оси шестигранных кристаллов ориентированы горизонтально и несколько колеблются или вращаются около такого положения, т. е. когда вместо пластинчатых кристаллов преобладают столбчатые.

Форма описанного гало сильно зависит от высоты Солнца (рис. 137). Когда оно невысоко, все, что можно видеть, — это верхнюю касательную дугу, изогнутую вниз с обеих сторон; на больших

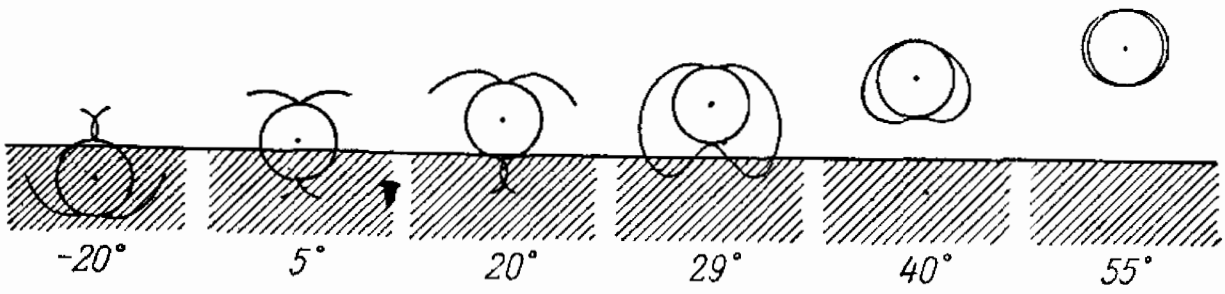



Рис. 137. Различные формы горизонтальных касательных дуг малого гало в зависимости от высоты Солнца.

высотах уже можно видеть эллиптическую фигуру. Части кривой под горизонтом определяются вычислением, и могут наблюдаться изредка с гор, когда взгляд может быть направлен вниз (по-видимому, это должно быть в равной степени возможно с башни или с самолета).

### 154. Косые касательные дуги малого гало или «косые дуги Ловица» (рис. 134, *d*) *)

Эти замечательные маленькие дуги идут наклонно от ложных солнц и касаются малого гало; явление очень редкое. Его можно увидеть только тогда, когда Солнце высоко и ложные солнца находятся на некотором расстоянии от малого гало. Эти дуги возникают, когда маленькие вертикальные ледяные призмы, которые вызывают образование ложных солнц, несколько колеблются около вертикали.

---

*) E. van Everdingen, Hemel en Dampkring **16**, 97, 1918; Onweders **39**, 66, 1918 и **43**, 44, 1922, Visser, Diss., Utrecht, 1936.

Часто мы видим лишь удлинение ложных солнц на 1 или 2°; малая дуга наклонена к горизонту приблизительно на 60°. Лишь однажды дуга была очень четкой и длинной *). Поэтому необходимо тщательно наблюдать ложные солнца для возможного прослеживания этого явления.

## 155. Дуга Парри (рис. 134, *e*)

Несколько искривленная малая дуга тотчас над малым гало видна очень редко! Она возникает, когда шестигранные призмы имеют тенденцию не только парить с осью в горизонтальном направлении, но и удерживать в горизонтальном положении одну из своих боковых граней.

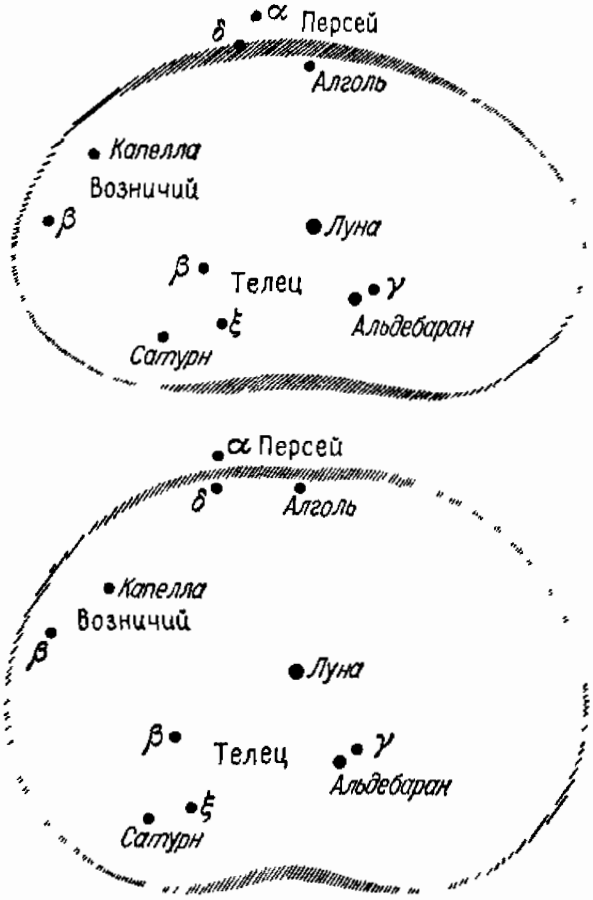



Рис. 138. Расположение окололунного гало относительно звезд (Onweders **35**; 119, 1914).

## 156. Большой круг или 46° гало (рис. 134, *f*)

Оно кажется вдвое дальше от Солнца, чем малое гало, и имеет те же цвета, однако, его яркость меньше и наблюдается оно гораздо реже. Желательны точные измерения радиуса внутреннего края. Образуется

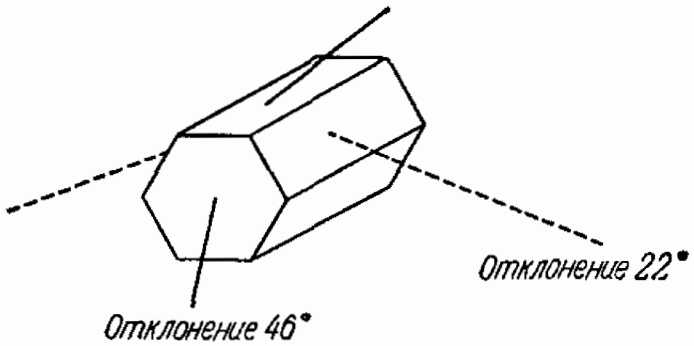



Рис. 139. В шестигранной призме угол наименьшего отклонения световых лучей может составлять или 22°, или 46°.

большое гало так же, как 22° гало (малый круг), однако, на этот раз вследствие преломления на 90-градусных призмах, ориентированных беспорядочно. Как показано на рис. 139, один и тот же тип ледяных кристаллов может вызвать и малое и большое гало.

## 157. Ложные солнца большого гало (рис. 134, *g*)

Они наблюдаются редко, и это не удивительно: чтобы вызвать их появление, ребро с преломляющим углом 90° должно быть ориентировано вертикально у большого числа кристаллов Если рассматривать обычные формы ледяных кристаллов, кажется немыслимым, что это вообще возможно.

*) Hemel en Dampkring **20**, 39, 1922.

## 158. Нижние касательные дуги большого гало (рис. 134, *h*)

Тоже редкое явление. Они возникают при определенной ориентации кристаллов, когда и оси и боковые грани горизонтальны, а преломляющий угол равен 90°. Когда Солнце очень высоко, можно видеть дугу выпрямляющейся и даже обращенной вогнутостью к Солнцу.

## 159. Верхняя касательная дуга большого гало (рис. 134, *i*)

Дуга может возникать лишь когда находящиеся в воздухе 90-градусные призмы или вращаются с горизонтальными преломляющими ребрами, или колеблются около этого положения. Те из них, которые расположены надлежащим образом, чтобы луч претерпевал наименьшее отклонение, и вызовут появление рассматриваемой касательной дуги. Часто видна дуга, очень напоминающая описываемую, но имеющая совершенно другое происхождение; это околозенитная дуга Бравэ, а не настоящая верхняя касательная дуга *).

## 160. Околозенитная дуга

Одно из наиболее красивых явлений гало. Она появляется сравнительно часто, особенно на приближающейся грозовой туче и представляет собой ярко окрашенную радужную дугу, параллельную горизонту; она обычно располагается на несколько градусов выше того места, где ожидается появление верхней касательной дуги большого гало.

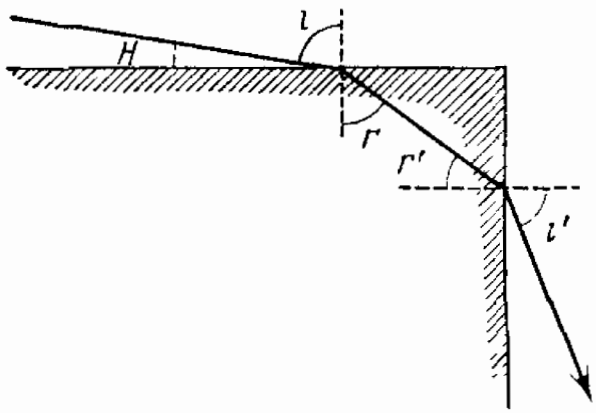



Рис. 140. Преломление светового луча прямоугольной ледяной призмой.

Чтобы объяснить ее появление, нужно вообразить себе кристаллы, имеющие форму пластинки или зонтика (рис. 136), парящие с вертикально направленными осями. Солнечный луч будет тогда преломляться на 90-градусной призме, но, вообще говоря, не в направлении наименьшего отклонения. Рис. 140 показывает, что

$$\sin i' = n \sin r' = n \cos r = n \sqrt{1 - \frac{\sin^2 i}{n^2}} = \sqrt{n^2 - \sin^2 i},$$

откуда сразу следует, что общий угол отклонения равен $i' + i - 90°$. Для высоты Солнца $H = 10°$ это составляет около 50°; для $H = 20°$ угол уменьшается до 46° (минимальное значение); для $H = 30°$ он снова возрастает до 49°.

*) Visser, Quart. Journ. **73**, 472, 1947.

При $H=32°$ наша формула дает $i'=90°$, и дуга исчезает; практически она наблюдается лишь при высоте Солнца от 15 до 25°. Это означает, что только в том случае, когда Солнце стоит высоко или очень низко, можно отличить околозенитную дугу от верхней касательной дуги большого круга (с углом отклонения 46°). Хорошим критерием служит также то, что настоящая околозенитная дуга всегда сопровождается появлением ложных солнц. Это очевидно, если учесть общее происхождение обоих явлений. Если облако, создающее ложные солнца, поднимается затем до высоты в 46°, почти всегда появляется околозенитная дуга.

Согласно общепринятой теории, невозможно увидеть эту дугу протяжением больше полуокружности, хотя сообщается, что несколько раз дуга наблюдалась в виде полуокружности,— так называемая дуга Керна *).

Если посчастливится одновременно наблюдать и касательную и околозенитную дуги, то между ними должен быть промежуток шириной в несколько градусов. И, действительно, однажды наблюдавшаяся широкая дуга, разделенная по всей своей длине темной полосой, внезапно появившейся и исчезнувшей через короткое время **), представляет собой своеобразный рекорд. Однако такие наблюдения чрезвычайно редки, так как для этого необходимо, чтобы одновременно существовали горизонтально парящие пластинки наряду с беспорядочно ориентированными.

### 161. Горизонтальный или паргелический круг (рис. 134, *k*)

Это — круг, проходящий параллельно горизонту на той же высоте, что и Солнце. Хотя временами его можно проследить вокруг всего неба, часто его трудно наблюдать близ Солнца, где небо весьма ярко. Тот факт, что круг не окрашен, ясно указывает, что он возникает вследствие отражения, а не преломления; в этом случае отражают боковые грани ледяных призм, парящих в воздухе с вертикально ориентированными осями.

Похожую световую полосу можно увидеть, если смотреть на источник света сквозь окно, протертое в одном направлении достаточно сальной тряпкой или на отражение источника света в рифленом стекле. Полоса света всегда располагается перпендикулярно к штрихам.

Это явление служит превосходным примером общего оптического явления: световые лучи, отражающиеся от полированного цилиндра, образуют коническую поверхность, для которой этот цилиндр служит осью ***).

*) Наблюдения Ламберта в 1838 г.; Month. Weather Rev. **50**, 132, 1922.
**) Month. Weather Rev. **50**, 506, 1920.
***) W. Maier (Zs. f. Meteor. **4**, 111, 1950) объясняет большинство явлений гало, основываясь на этой теореме.

## 162. Световые или солнечные столбы *)

Вертикальные световые столбы или, скорее, «световые мечи» можно видеть весьма часто при заходе или восходе Солнца, лучше всего — когда Солнце скрывается за домом и не слепит глаза. Такой световой столб сам по себе бесцветен, но когда Солнце низко и становится желтым, оранжевым или красным, столб принимает тот же оттенок. Это происходит лишь при высоте Солнца около 5°, редко 15° и более. Когда Солнце высоко, столбы видны редко; с другой стороны, часто они хорошо видны, когда Солнце в действительности находится под горизонтом. Столбы под Солнцем появляются редко; они короче, чем над Солнцем.

Случайное усиление яркости светового столба, когда он попадает на облако, создает впечатление светового пятна. Это явление получило название «двойного Солнца». Его лучше наблюдать, когда пятно находится над Солнцем, а не под ним.

Представим себе облако ледяных пластинок, совершенно горизонтальных и падающих очень медленно. При этих условиях они отражают лучи Солнца; отраженные лучи не будут, однако, попадать в наш глаз. Но как только те же самые ледяные пластинки становятся наклоненными по отношению к горизонту на малый угол $\Delta$ по всем азимутам (рис. 141), отраженные лучи будут испытывать всевозможные малые отклонения и, если наклон остается меньшим $\frac{H}{2}$ ($H$ — высота Солнца), под Солнцем возникнет световой столб приблизительно так же, как возникает световая дорожка на покрытой рябью поверхности воды (§ 14); когда наклон пластинок превышает $H$, мы видим не только столб под Солнцем, но и более слабый столб над ним.

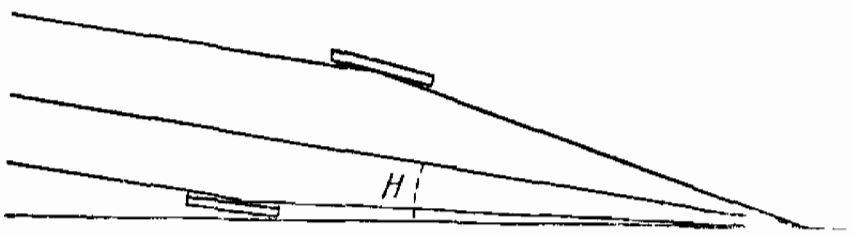



Рис. 141. Простейшее объяснение образования световых столбов под и над Солнцем.

Это объяснение, однако, в двух пунктах противоречит наблюдениям. Прежде всего, столбы должны всегда быть ярче под, а не над Солнцем; кроме того, они никогда не должны наблюдаться над Солнцем, если его высота значительна, поскольку отклонения ледяных пластинок от их горизонтального положения сравнительно малы. И то и другое неверно.

Световые столбы можно было бы приписать двойному отражению, но тогда (это можно доказать математически) световое явление

*) E. van Everdingen, Onweders **28**, 77, 1907; C. Schoute, Hemel en Dampkring **7**, 1, 1909; K. Stuchtey, Ann. d. Phys. **59**, 33, 1909. См. также литературу, указанную к § 17.

должно быть гораздо слабее, а столбы гораздо шире, чем это обычно бывает. Другое объяснение состоит в том, что столбы возникают на ледяных пластинках, быстро вращающихся вокруг горизонтальной оси и поэтому получающих всевозможную ориентировку в пространстве. Наконец, заметили, что луч может проникать в горизонтальные пластинки через боковые грани, отражаться от основания и снова выходить через другую боковую грань. Это последнее предположение кажется наиболее вероятным и хорошо объясняет распределение яркости.

Световые столбы кажутся таким простым явлением; кто мог бы думать, что их объяснение встретится с такими трудностями?

### 163. Световые кресты (фотография XV)

Когда и вертикальный столб и часть горизонтального круга возникают одновременно, мы видим на небе крест. Указывать, что суеверные люди видят их слишком часто, конечно, излишне.

14 июля 1865 г. альпинист Уимпер и его спутники впервые достигли вершины Маттерхорна, но на обратном пути четверо поскользнулись и сорвались в пропасть. К вечеру Уимпер увидел на небе световой круг с тремя крестами: «Световой призрак висел неподвижно; это было удивительное и внушающее трепет зрелище, впервые видимое мной и неописуемо впечатляющее в такой момент».

### *164. Субсолнце*

Оно наблюдается только с горы или с самолета и представляет собой несколько удлиненное неокрашенное отражение; Солнце отражается не в поверхности воды, но в облаке! Облако ледяных пластинок, чрезвычайно спокойно плывущее по небу, ответственно за сравнительно резкое изображение.

При благоприятных обстоятельствах эллиптическое световое пятно можно видеть окруженным эллиптическим дифракционным кольцом радиусом 0,5—1°,0. По-видимому, все ледяные кристаллы имеют приблизительно одинаковую величину и действуют подобно малым отверстиям; наблюдатель смотрит под углом к горизонту, так что вертикальные размеры сокращаются и дифракционная картина кажется более широкой в этом направлении *).

### 165. Двойное солнце

Иногда мы видим световое пятно тотчас над Солнцем, очень редко — под ним. Расстояние между Солнцем и этим его туманным отражением не превышает 1—2°. В некоторых исключительных

*) Ch. F. Squire, J. Optic. Soc. Amer. **42**, 782, 1952 и **43**, 318, 1953.

случаях над солнечным диском существует два или даже три таких изображения. По-видимому, это явление вызывается просто местными изменениями яркости светового столба из-за неравномерного распределения облаков.

### 166. Очень редкие и сомнительные явления гало

Кроме уже обсуждавшихся многочисленных форм гало, ниже приводится краткий список, имеющий целью дать некоторое представление об изумительном многообразии гораздо более редких явлений, возникающих в совершенно неожиданные моменты с удивительной ясностью *).

Круги вокруг Солнца в 6—7, 9—11½, 15, 16½, 18—20, 24½, 27½, 33—34°. Всегда, когда вы смотрите на эти слабо светящиеся круги, тщательно заслоняйте Солнце! Круги образуются вследствие преломления в пирамидальных ледяных кристаллах, случайно ориентированных. Поэтому часто возникает несколько кругов одновременно.

90-градусный круг вокруг Солнца, белый, иногда с верхней касательной дугой **). Круг вокруг Солнца, радиусом 120°.

*Антелий* — световое пятно на горизонтальном круге в точке, противоположной Солнцу, обычно бесцветное и весьма расплывчатое.

Ложные солнца на 90-градусном круге; в 33° от Солнца; в 19° от Солнца.

Белые световые пятна (*парантелии*) на горизонтальном круге в 120° от Солнца; также в 40° (?); 84—100° (?); 134° (?); 142° (?); 165° (?).

Сожное Солнце под горизонтом, видимое с самолета или с горы как отражение обычного ложного Солнца.

Световые столбы над ложными солнцами и над антелием. Ложные солнца ложных солнц (вторичные явления гало). Ложные солнца, располагающиеся там, где малый круг и вертикальный столб пересекают горизонт.

Верхняя касательная дуга у кругов 11°,5 и 24°,5 ***).

Касательная дуга к малому кругу у ложных солнц.

Косые дуги через Солнце и косые дуги через антелий, обычно белые, однажды наблюдались окрашенными.

---

*) Многочисленные интересные наблюдения имеются в журнале Hemel en Dampkring и в публикациях Нидерландского Королевского метеорологического института «Onweders en Optische Verschijnselen»; общий обзор: S. W. Visser Optische Vershynselen, 1957.

**) Ф. Я. Клинов, Природа, Сентябрь 1955, стр 85.

***) S. W. Visser, C. T. J. Alkemade, Quart. Journ. Roy. Meteor. Soc. **82**, 92, 1956; Hemel en Dampkring **52**, 92, 1954.

Косой круг через Солнце, опускающийся к горизонту в стороне, противоположной Солнцу.

Дуги в стороне, противоположной Солнцу, т. е. круги вокруг антелия с радиусом 33, 35, 38°.

Необычные околозенитные дуги на разных высотах. Эллипс вокруг Солнца с вертикальной большой осью в 10° и горизонтальной малой 8°.

Гало Буге вокруг противосолнечной точки с радиусом 35—38°. Его часто трудно отличить от белой радуги; но гало Буге совершенно не окрашено, не имеет вторичных дуг и обычно сопровождается другими явлениями гало.

## 167. Косые и искаженные явления гало

Иногда наблюдаются «вертикальные» столбы, наклоненные к вертикали даже на 20°! Напоминающие столбы косые дорожки на взволнованной воде объясняются преобладающим направлением волн; здесь же мы можем, очевидно, предположить, что ледяные кристаллы не парят горизонтально, но уносятся в сторону воздушными токами; как именно это происходит, объяснить нелегко.

Известно также, что верхняя касательная дуга может касаться малого круга в 10—12° от его верхней точки.

Горизонтальный круг изредка бывает наклоненным к горизонту. Однажды, этот круг проходил на 1—2° ниже Солнца! Ложное Солнце на малом круге однажды наблюдалось на 40′ выше, чем следовало; это было видно совершенно отчетливо, так как Солнце почти село.

Необходимо увеличивать число наблюдений; следует особенно тщательно исключать все личные ошибки в суждениях; использовать отвес; фотографировать, держа отвес на некотором расстоянии перед камерой так, чтобы он выходил (несколько расплывчато) на пластинке.

## 168. Степень развития явлений гало

Неопытный наблюдатель всегда переоценивает правильность природных явлений: он изображает снежинки совершенно симметричными, насчитывает в радуге семь цветов и видит молнию как зигзаг! Подобно этому существует тенденция описывать явления гало, считая их более совершенными, чем они есть на самом деле. Однако существенно, видите ли вы весь круг малого гало или половину его. «Несовершенство» природных явлений также управляется определенными законами и представляет собой лишь другое проявление правильности.

Поэтому важно отмечать степень развития каждого явления гало, оценивая его интенсивность и протяженность его видимой части. Усредняя наблюдения, можно в большинстве случаев исключить влияние случайных неправильностей в распределении облаков. Как правило, части гало, интенсивность которых наибольшая, развиваются чаще всего. Особенно яркое гало отличается (также в среднем) большой протяженностью. Умеренно разреженный слой облаков наиболее благоприятен для развития гало; очень разреженные слои содержат слишком мало кристаллов, а очень плотные — не пропускают достаточно света и, кроме того, рассеивают его во всех направлениях.

Очень интересен тот факт, что верхняя часть малого круга видна в среднем приблизительно в три раза чаще, чем нижняя Предположительно это объясняется тем, что путь лучей сквозь слой облаков гораздо длиннее для нижней части; впрочем, это может быть столь же выгодным, сколь и невыгодным.

## 169. Гало в облаках, образовавшихся вслед за пролетевшим самолетом

Уже много раз были замечены явления гало в облаках, образующихся за самолетом. Часто можно наблюдать ложные солнца, которые появляются иногда во всем своем великолепии. Можно также видеть большой круг, малый круг, околозенитную дугу и противосолнце.

Из этих наблюдений вытекает, что ледяные кристаллики в следе самолета в большинстве своем ориентированы вертикально.

## 170. Явления гало, возникающие близ глаза

Прогуливаясь вдоль узкой улицы, наблюдатель увидел гало вокруг Луны и вдруг заметил, что часть этого гало проектировалась на темную стену, образуя единое целое с остальной частью, видимой на фоне неба. Заслонив Луну рукой, он по-прежнему увидел гало. Таким образом, явление не могло возникнуть в самом глазу; по-видимому, между глазом и стеной всего в нескольких метрах над Землей парили ледяные кристаллы.

В холодный вечер (—10°) было замечено прекрасное гало в паре паровоза на железнодорожной станции в Утрехте. Около фонаря, где облако пара простиралось во всех направлениях, можно было видеть световую сигаровидную поверхность, один конец которой примыкает к глазу, а другой — к фонарю (рис. 142). Все кристаллики, проходящие сквозь эту поверхность, освещены; пространство вне ее совершенно темное; конус, касательный к поверхности, имеет

угол при вершине около 44°. Ясно, что сигаровидная поверхность есть геометрическое место таких точек $P$, для которых сумма углов $O$ и $L$ треугольника $OPL$ составляет 22°.

Замечательная черта этого наблюдения — трехмерность явления. Она выявляется потому, что источник света близок, и глаза наблюдателя, действуя совместно, различают отдельные световые точки и оценивают расстояние до них.

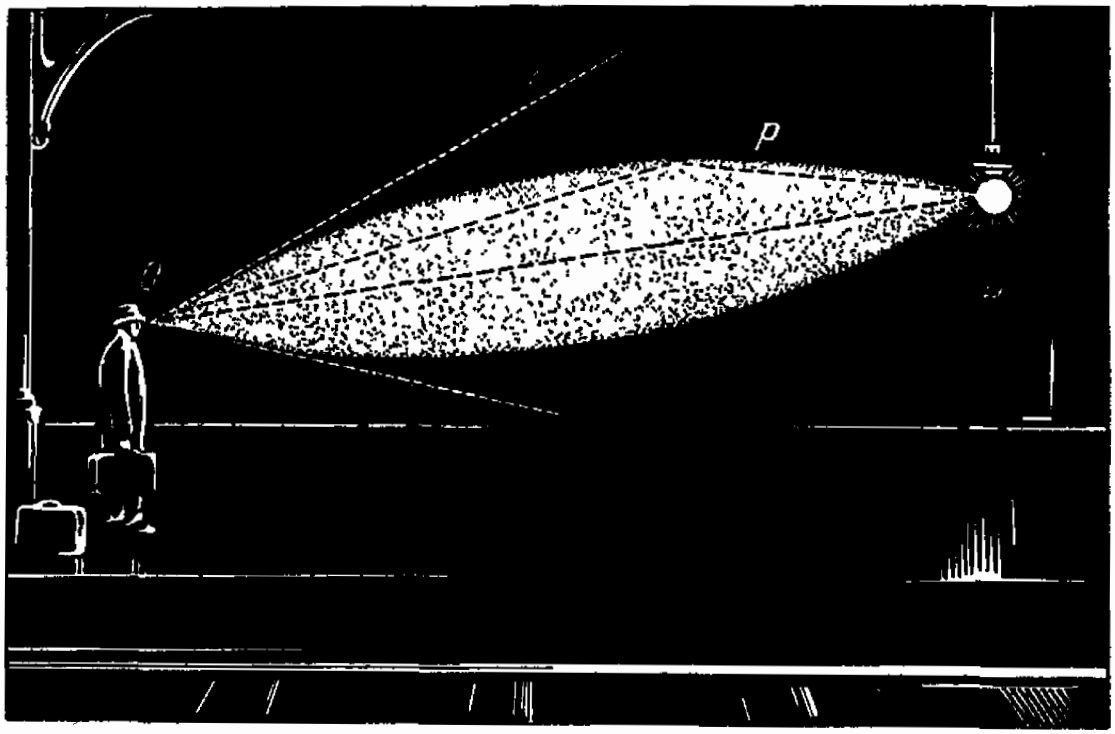



Рис. 142. Малое гало, наблюдаемое в непосредственной близости к глазу.

В тот же самый вечер, в более тихой части станции, у фонарей наблюдались световые кресты. Это явление не ново; в России и в Канаде зимой у далеких фонарей часто видны световые столбы, которые указывают на присутствие в воздухе мельчайших ледяных кристалликов.

Малое гало, ложные солнца, верхняя касательная дуга и большое гало иногда наблюдались в снежных вихрях.

В одном случае наблюдатель заметил также субсолнце, окруженное полным околосубсолнечным 22° гало! Оно было более туманным и менее окрашенным, чем обычное гало; Солнце имело высоту всего лишь в 11°, и часть гало была видна в проекции на фон далеких гор *).

Примечательно, что ложные солнца в таких случаях часто видны как вертикальные световые столбы радужных цветов. Эти столбы достигают иногда высоты 15°!

---

*) Gaber, Zs f. Meteor. 8 127, 1954.

## 171. Явления гало на поверхности Земли

Подобно тому, как мы видим радугу на росе, мы можем иногда видеть на свежевыпавшем снеге, особенно если температура низка (—12° или меньше), малый и большой круги, имеющие форму гиперболических дуг (рис. 143). Несколько чаще гало наблюдается на инее *). Его можно увидеть, когда Солнце низко, самое большое через полчаса-час после восхода Солнца или до его захода. Световая полоса состоит из множества отдельных цветных кристаллов, сверкающих чудесными красками, главным образом красными и золотисто-коричневыми, однако цвета, по-видимому, не очень насыщены. Если вы передвигаетесь, световое явление движется вместе с вами.

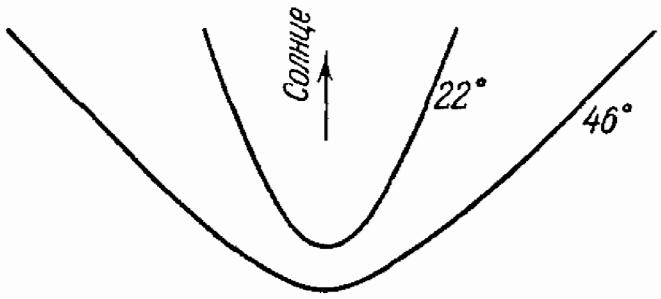



Рис. 143. Малое и большое гало на земле, покрытой свежевыпавшим снегом, кажутся дугами гипербол.

Угол, заключенный между прямыми, идущими от глаза и от Солнца к кристаллу, может быть определен простыми измерениями, и вы можете показать, что световые лучи преломляются под углом в 22° (или 46° соответственно). Изучите форму кристаллов при помощи лупы, измерьте их, а затем зарисуйте или сфотографируйте.

### ВЕНЦЫ

## 172. Цвета интерференции в масляных пятнах

На влажном после дождя темном асфальте дороги мы нередко видим пятна, состоящие из концентрических цветных кругов; диаметр пятен достигает иногда 50 *см*. В некоторые дни и на некоторых дорогах пятна могут оказаться очень красивыми, хотя, как правило, в большинстве своем — это неприглядные серо-синие пятна. Они, очевидно, связаны с каплями масла от проезжающих автомобилей. Каждая капля растекается очень тонким слоем, и сложение света, отраженного от верхней и от нижней поверхностей слоя, вызывает появление цветов интерференции, иными словами, знаменитых «колец Ньютона»,— тех же, что и в великолепных цветах мыльных пузырей. Их объяснение можно найти в обычном учебнике физики; я только хочу отметить, что здесь перед нашими глазами доказательство того, что свет — это волновое явление.

Цвета перечислены в следующей таблице (при переходе от внешней части пятна к его центру); толщина масляного слоя дана в микронах *мк* (1 *мк*=0,001 *мм*).

*) Listing, Ann. d. Phys. **122**, 161, 1864; Meyer, Das Wetter **42**, 137, 1925.

| I | мк |
|---|---|
| Черный | 0 |
| Тускло-серый | 0,080 |
| Коричнево-желтый | 0,115 |
| Красный | 0,170 |

| II | мк |
|---|---|
| Фиолетовый | 0,190 |
| Синий | 0,210 |
| Зеленый | 0,270 |
| Желтый | 0,305 |
| Красный | 0,340 |

| III | |
|---|---|
| Фиолетовый | 0,385 |
| Синий | 0,400 |
| Зеленый | 0,455 |
| Желтый | 0,505 |
| Телесный | 0,525 |

| IV | |
|---|---|
| Серо-синий | 0,595 |
| Зеленый | 0,655 |
| Телесный | 0,695 |
| Тусклый сине-зеленый | 0,820 |

Слои масла, таким образом, тоньше всего на краю и утолщаются к центру. Иногда они даже в центре не переходят за первую ступень цветовой шкалы. В других случаях слой настолько толст, что после цветов, отмеченных в нашей таблице, розовый и зеленый несколько раз сменяют друг друга, становятся постепенно все более тусклыми и превращаются в «белый цвет более высокого порядка», так что в середине кольца цвета уже не видны.

Измерьте диаметр пятна правильной формы в различных цветах, и затем вычертите в масштабе поперечный разрез масляного слоя (рис. 144). Повторив это спустя десять минут, вы увидите, что масляная «горка» стала более плоской. Проследите, как меняется со временем какой-либо определенный цвет: вы увидите, что кольцо сначала расширяется, а затем сжимается. Почему? В конце концов вы увидите серое пятно, происхождение которого навсегда осталось бы тайной, если бы оно не образовалось у вас на глазах! Лучше всего наблюдать за отдельным пятном и подмечать все его изменения. Для этого не требуется особенно много терпения, вероятно, не больше чем на полчаса. Охраняйте пятно от велосипедистов и пешеходов! Если вам повезет, оно достигнет конца своей жизни прежде, чем по нему проедет автомобиль.

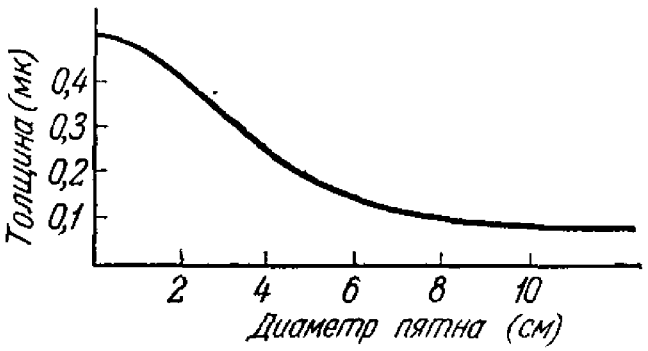



Рис. 144. Схематический разрез капли масла на влажном асфальте. Толщина измерена по цветам интерференции.

Посмотрите на масляное пятно сбоку; цвета сместятся, как если бы слой стал толще. Если посмотреть под еще бо́льшим углом, цветные кольца покажутся сжавшимися, так что в каждой точке первоначальная окраска сменится окраской более толстого кольца. Попытайтесь объяснить это, рассчитав разность фаз для двух интерферирующих лучей.

Мальчик тронул пятно пальцем; цвета стали меняться, но неожиданно быстро восстановили свое положение; количество масла несколько уменьшилось, и кольца чуть-чуть сошлись.

Иногда мы видим двойные пятна правильной формы, по-видимому, связанные друг с другом. В этом нет ничего удивительного — это обычное пятно, по которому проехало колесо автомобиля.

Мы и сами можем воспроизвести эти красочные кольца. Капля керосина или капля скипидара на поверхности водоема создает удивительно красивые цвета. Но если вы для этого опыта попытаетесь использовать масло, вас ждет неожиданность. Масло не растечется по поверхности жидкости, и мы ничего не увидим. Однако то же самое, что на поверхности воды, должно происходить и на мокрой дороге. Может быть, пятна на дороге вызваны бензином, а не маслом? Снова нас ждет разочарование: бензин вызывает только серо-белые пятна (слой его, по-видимому, чрезвычайно тонок), не порождающие ничего похожего на великолепные цветные кольца. Тщательное исследование показало, что лишь использованное масло, выброшенное из машины, способно растекаться по мокрой поверхности *). Чем более окислено масло, тем тоньше образующийся слой.

У большей части масляных пятен видны радиальные полоски. Каждое цветное кольцо, как и наружное бело-серое, отделено от следующего «бахромой». У пятна из чистого бензина на мокрой дороге образуются со всех сторон заливы и выступы, обусловливающие, как мы ожидаем, радиальные полосы и бахрому. Это же явление часто можно наблюдать в цветных пленках, плавающих на поверхности грязной воды. Возможно, что здесь действуют сложные молекулярные силы.

Цвета интерференции возникают всюду, где образуются тонкие пленки; например, в тонких слоях нефти или керосина, плавающих на поверхности воды; линии одинакового цвета суть линии постоянной толщины, и их искажения говорят нам о всех токах и вихрях в жидкости. Если на воде случайно окажется слой масла и в это время к берегу подует ветер, мы сможем наблюдать прекрасную интерференцию цветов. Цвета будут распределены параллельными полосами. Это доказывает, что слой к берегу постепенно становится толще. Интересно наблюдать за тем, как рябь на воде постепенно уменьшается, как только к ней приближается масляный слой, и совсем исчезает даже прежде, чем вода начинает покрываться серой пеленой.

Следовательно, уже слой тоньше, чем 0,08 *мк*, достаточен, чтобы рябь на водной поверхности исчезла.

---

*) K. B. Blodgett, J. Optic. Soc. Amer. **24**, 313, 1934.

Прекрасные цвета можно иногда видеть на потускневшей меди старой паровозной трубы. Происходит ли это потому, что медь была нагрета, а затем окислилась? Или на трубе образовался слой сульфидов из атмосферы и топочных газов?

## 173. Цвета на замерзшем оконном стекле *)

Это малоизученное явление можно регулярно наблюдать в холодные зимние вечера (—10°), находясь в поезде или автобусе. Пары дыхания пассажиров конденсируются и замерзают на окнах старого железнодорожного вагона. Каждый фонарь, мимо которого проходит поезд, вызывает великолепную игру цветов: одни участки тонкого намерзшего слоя становятся небесно-голубыми, другие — зелеными или красными. Эти цвета кажутся более или менее одинаковыми на площади около 1 $см^2$, и все они наблюдаются только в проходящем, но не в отраженном свете. Оттенки настолько чисты и красивы, что вам это невольно кажется чем-то чудесным. Явление длится несколько минут, а затем слой льда достигает толщины в несколько десятых миллиметра, и цвета исчезают.

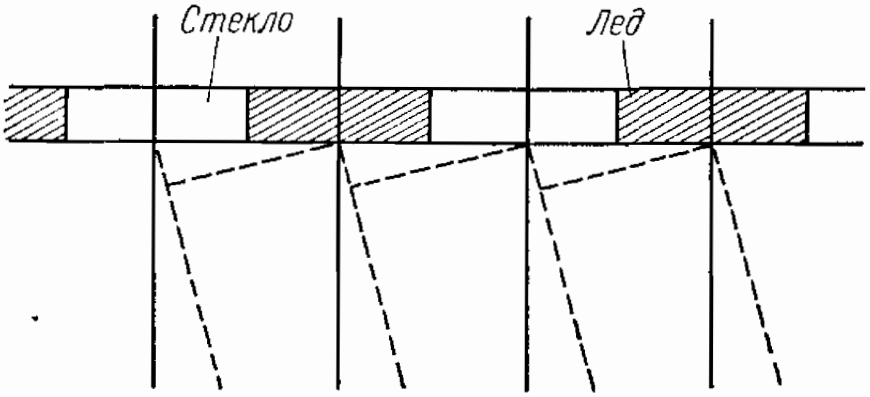


Рис. 145. К объяснению появления цветов интерференции на замерзших окнах.

Если вы подышите на очень холодное оконное стекло, влага вашего дыхания, по-видимому, замерзнет сначала в маленькую полушаровую глыбку льда (а); приблизительно через полминуты в слое возникнут трещины, и ледяные частицы объединятся в маленькие группы (б), пока, наконец, они не образуют длинных игл, между которыми можно видеть прозрачный лед (в). Только на стадии (б) видны цвета; это и объясняет их кратковременность. Другая типическая особенность состоит в том, что фонарь или другой источник света *сами кажутся окрашенными* и окруженными ореолом дополнительного цвета; например, днем яркие участки снежного пейзажа кажутся розово-красными, а более темные — зелеными.

Чтобы объяснить это замечательное явление, предположим, что пленка образована из многочисленных маленьких разнородных участков, в данном случае — участков льда и воздуха. Часть лучей прошла через лед, другая — через воздух, так что образовалась

*) Наблюдения Ch. F. Brooks, Month. Weather Rev. **53**, 49, 1925; Schlottmann, Meteor. Zs. **10**, 156, 1893.

разность фаз, ввиду различия скорости света в воздухе и во льду. Интерференция гасит определенный цвет, и источник света окрашивается в дополнительный. Дифракция по краям участков создает ореол света около источника. Нужно полагать, что толщина пленки около 1 *мк* и что расстояние между ледяными частицами около 0,1 *мм*. Так мы толкуем цвета замерзшего стекла как «цвета смешанных пластинок» *).

В других случаях, когда температура не так низка, на оконном стекле возникают настоящие венцы, но с необычным порядком цветов.

## 174. Цвета интерференции в ржавой воде

Коричневая вода в канавах, в местах, где почва содержит железо, бывает иногда покрыта тонким иризирующим слоем, бледные цвета которого напоминают перламутр. Эти цвета обусловлены коллоидальным раствором окиси железа, частицы которой, образующие маленькие плоские пластинки, удалены друг от друга на расстояние около $^1/_4$ длины волны света **). Эти плоские пластины действуют более или менее сходно с липпманновой цветной фотографией.

## 175. Дифракция света

Ночь. Вдалеке шум автомобиля, приближающегося к нам. Его фары бросают ослепительные лучи света на широкую дорогу. Велосипедист случайно пересекает эти ослепительные лучи так, что мы на мгновение оказываемся в его тени. И тогда внезапно силуэт велосипедиста обрисовывается удивительно красивым светом, как будто излучаемым краем силуэта. Тот же эффект можно наблюдать у пешеходов и у деревьев. Это — эффект дифракции. Дифракцией называют искривление световых лучей у края непрозрачного экрана, при котором часть волнового фронта проникает в область, где согласно законам геометрической оптики следовало бы ожидать тень. Интенсивность отклоненного света велика, если угол отклонения очень мал, но быстро уменьшается для больших углов. Картина особенно красива, когда велосипедист далеко от нас, а автомобиль далеко за ним.

Подобное явление, но большего масштаба, можно наблюдать в гористой стране. Если воздух чист, то, стоя в тени холма, вы видите темные очертания покрывающих его деревьев на фоне утреннего неба. Когда Солнце вот-вот должно показаться из-за холма,

---

*) Р. В у д, Физическая оптика, ОНТИ, 1936, стр. 300.
**) Z o c h e r, Zs. f. allg. anorg. Chem. **149**, 203, 1925.

деревья, расположенные там, где свет ярче всего, окаймляются сверкающим серебристо-белым сиянием *).

Говорят, что в Нидерландах кусты дрока, если смотреть на них против Солнца, могут вызвать похожий эффект.

### 176. Дифракция света на малых царапинах (рис. 146)

Если вы посмотрите на Солнце через окно поезда, вы увидите тысячи чрезвычайно тонких царапин на стекле, располагающихся концентрически вокруг Солнца. Через какую бы часть окна мы ни смотрели, картина будет одна и та же. Из этого можно сделать вывод, что стекло сплошь во всех направлениях покрыто мелкими

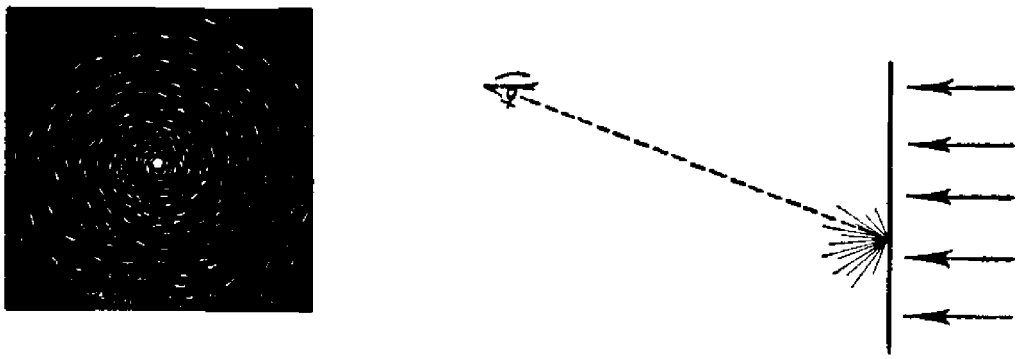


Рис. 146. Дифракция света на мелких царапинах оконного стекла.

царапинами, хотя мы замечаем лишь те из них, которые направлены перпендикулярно к плоскости падения световых лучей (ср. § 26). Это происходит потому, что каждая царапина рассеивает свет лишь в плоскости, перпендикулярной к ее собственному направлению, и потому видна лишь наблюдателю, расположенному в этой плоскости.

Когда такие царапины очень тонки, уже нельзя говорить об отражении или преломлении. В этом случае отклонение световых лучей лучше рассматривать как дифракцию. Если тщательно всмотреться в одну из таких царапин, вы увидите, что в определенных направлениях она показывает великолепные цвета в любых сочетаниях; если воспользоваться николем или поляроидом, вы найдете, что свет сильно поляризован, когда направления падения и наблюдения наклонны. Все эти явления очень сложны **). Подобные явления дифракции вы обнаружите и в нитях паутины, которые сияют одним и тем же цветом, если рассматривать каждую нить в отдельности. Это доказывает, что диаметр такой нити везде одинаков.

*) Это явление, наблюдавшееся Фоли, было в то время предметом многочисленных обсуждений. Их можно найти в Rep. Brit. Ass. **42**, 45, 1872; позже в Nature **47**, 364; Zs. f. Meteor **12**, 410, 1877; La Nature **21**, 58, 1893.

**) F i z e a u, ann. Chimphys. **63**, 385, 1861; R a y l e i g h, Phil. Mag. **14**, 350, 1907; Papers, V, 410.

## 177. «Венцы»

Тонкие белые барашки облаков медленно скользят перед Луной. Наш взгляд невольно притягивается к этой освещенной части неба — центру ночного пейзажа. И каждый раз, когда появляется еще одно небольшое облако, мы видим вокруг мягко светящей Луны чудесные разноцветные кольца, диаметр которых лишь в несколько раз больше диаметра Луны. Во Фландрии существует поговорка, что это «месяц сидит во дворце».

Рассмотрим более тщательно последовательность этих цветов. Непосредственно к Луне примыкает синеватая кайма, переходящая в желтовато-белую, которая в свою очередь имеет коричневатый внешний край. Этот ореол и есть венец в его простейшей и чаще всего встречающейся форме. Он становится действительно замечательным, когда его окружают большие и еще более красивые окрашенные кольца. Последовательность этих цветов указана в приводимой ниже таблице, которая почти точно согласуется с ньютоновой шкалой цветов интерференции, с тем лишь отличием, что метеорологи разграничивают различные «порядки» несколько по-другому, чем физики, а именно так, чтобы каждая группа оканчивалась красным. В очень редких случаях за ореолом можно наблюдать три группы («четырехкратный венец»):

I. Ореол (синеватый) — белый — (желтоватый) — коричнево-красный.
II. Синий — зеленый — (желтый) — красный.
III. Синий — зеленый — красный.
IV. Синий — зеленый — красный.

На практике, однако, цветовые градации кажутся меняющимися от времени до времени; цвета, приведенные в скобках, видны далеко не всегда. Исследуя эти изменения венцов, следует принять во внимание фазы Луны, поскольку они обусловливают большую или меньшую размытость дифракционной картины.

Лучший способ оценки радиуса венца — это принять за исходную точку край красной каймы, которой заканчивается каждый порядок, поскольку этот цвет выступает наиболее резко, а затем сравнить величину венца с диаметром самой Луны (32′). Размеры венцов сильно меняются: коричневый край ореола, например, может иметь радиус всего в 1°, в то время как в других случаях он достигает 5°. Зарегистрированные крайние значения: 10′ и 13°.

Венцы вокруг Солнца можно видеть очень часто, по крайней мере так же часто, как вокруг Луны, однако их замечают гораздо реже, поскольку все мы, естественно, избегаем смотреть на ослепляющий свет. А ведь благодаря большой светимости Солнца венцы вокруг него наиболее красивы.

Наблюдения можно облегчить, воспользовавшись одним из следующих советов:

а) Наблюдать отражение Солнца в спокойной воде; именно так Ньютон сделал свое знаменитое наблюдение венца вокруг Солнца.

б) Использовать в качестве зеркала кусок черного полированного марблитового стекла, или плотные защитные очки, какие носят сварщики, или, наконец, обыкновенный кусок стекла, покрытый с обратной стороны черным лаком. Чтобы увеличить поле зрения, такую пластинку следует держать около глаза.

в) Подобрать марблитовое стекло или очки сварщика настолько непрозрачные, чтобы можно было наблюдать Солнце, не будучи ослепленным.

г) Наблюдать, когда вершина крыши заслоняет Солнце.

д) Смотреть в зеркальный садовый шар с расстояния в 1—2 *м* так, чтобы голова заслоняла изображение самого Солнца.

Слабый ореол наблюдается при любом типе облаков. Он гораздо сильнее в слоисто-кучевых облаках, при которых обычно существует и слабое указание на второе окрашенное кольцо. Наиболее красивые венцы с восхитительно чистыми оттенками возникают в высококучевых облаках; венцы наблюдались также и в перисто-кучевых.

Временами небольшие слабо светящиеся венцы видны даже вокруг Венеры, Юпитера и наиболее ярких звезд.

## 178. Объяснение венцов *)

Венцы, которые мы видим в облаках, образуются вследствие дифракции света на каплях воды в облаке. Чем меньше капли, тем больше венец. Если все капли одинаковой величины, венцы хорошо развиты и цвета их чисты; если же в облаках перемешаны капли разных размеров, венцы различной величины возникают одновременно и накладываются друг на друга. Поэтому хорошо развитые венцы возникают лишь в совершенно определенных видах облаков, в которых условия конденсации водяных паров всюду достаточно постоянны; по той же причине тонкие различия в последовательности цветов зависят от числа капель различной величины, от толщины облаков и т. д. Основные положения этой теории таковы:

а) Дифракция на сравнительно плотном облаке, состоящем из водяных капель одинаковой величины, происходит так же, как на одной капле, лишь интенсивность дифрагировавшего света больше.

б) Дифракция на капле происходит так же, как на малом отверстии в экране (принцип Бабине).

в) Дифракция на отверстии рассчитывается согласно принципу Гюйгенса: принимается, что каждая точка отверстия излучает

---

*) R. Meyer, Metecr. Zs. 27, 112, 1910; G. C. Simpson, Quart. Journ. 38, 291, 1912; Ch. F. Brooks, Month. Weather Rev. 53, 49, 1925 (библиография); Köhler, Meteor. Zs. 40, 257, 1923.

световые волны, и определяется, как интерферируют эти волны от всех частей отверстия, приходя в глаз.

Легко наблюдать сходство между венцом и дифракционной картиной от круглого отверстия. Повесьте перед окном, в которое светит Солнце, кусок картона с прорезью в середине, заклеенной серебряной бумагой. В серебряной бумаге проколите иглой отверстие и смотрите на эту сверкающую световую точку в направлении на Солнце с расстояния приблизительно в полметра, держа перед глазом второй кусок серебряной бумаги, также проколотый иголкой. Эти отверстия следует проделать наиболее тонкой иголкой, вращая ее между пальцами; сами отверстия должны быть не больше 0,5 *мм* в диаметре. Эти маленькие отверстия, когда вы будете смотреть сквозь них, превратятся в диск, представляющий собой миниатюрный ореол, а вокруг него вы увидите систему колец, соответствующих последовательным порядкам венца. Чем меньше отверстие перед вашим глазом, тем больше дифракционная картина.

Последовательные максимумы и минимумы во всех отношениях сравнимы с дифракционными полосами от узкой щели, несколько отличаются лишь расстояния. Расстояния красного наружного края ореола и красной каймы первого порядка будут $\delta = \frac{0{,}00070}{a}$ и $\frac{0{,}00127}{a}$ ($a$ — диаметр отверстия в миллиметрах; $\delta$ — угловое расстояние, измеряемое от центра).

Мы можем таким образом определить по венцу размер капель в облаке. Если радиус $\delta$ ореола равен четырехкратному диаметру Луны, т. е. $\frac{4}{108}$ радиана, то облако состоит из капель с диаметром $\frac{108}{4} \times 0{,}00070 = \frac{0{,}076}{4} = 0{,}019$ *мм*. Этот расчет не вполне точен, так как Луна, как и Солнце, не является точкой, а имеет радиус в 16′.

Видимый радиус венца становится поэтому слишком большим и потому из угла $\delta$, полученного при наблюдениях, часто вычитают 16′, прежде чем воспользоваться приведенной выше формулой, хотя законность этой операции очень сомнительна. В результате мы находим, что размер капель в облаке составляет от 0,01 до 0,02 *мм*.

Возможно, что венцы могут также возникать на облаке, состоящем из ледяных игл одинаковой толщины, на которых дифракция света происходит так же, как на щели. Ведь хорошо развитые венцы с яркими цветами наблюдаются иногда на тонких перистых облаках, а эти облака состоят из ледяных игл.

Толщина ледяной иглы может быть вычислена так же просто, как размер водяной капли: в случае указанного выше венца, у которого коричневая кайма имеет радиус, равный четырехкратному диаметру Луны, толщина ледяных игл должна быть $\frac{0{,}062}{4} = 0{,}015$ *мм*.

Наблюдая венец, очень трудно сказать, возникает ли он на водяных каплях или на ледяных иглах В случае ледяных игл расстояния между последовательными темными минимумами в точности одинаковы и равны расстоянию первого минимума от центра, в то время как в случае водяных капель радиус ореола на 20% больше, чем ширина колец следующих порядков Однако подметить эти различия нелегко. Наилучшие измерения указывают в одни моменты на один способ образования, в другие моменты — на другой, в обоих случаях согласно с тем, что следует ожидать, судя по виду облаков.

При непосредственном наблюдении с самолета оказалось, что венец в 45% возникает на водяных каплях, а в 55% — на ледяных кристаллах *).

Для физика красивый венец — это не только показатель большой однородности капель или ледяных игл в облаке. Венец указывает также, что облако, вероятно, образовалось совсем недавно, что это — «молодое облако». Дело в том, что капли, образовавшись, не остаются одинаковыми: те, которые случайно оказались несколько меньшими, быстрее испаряются, в то время как большие быстро растут за счет малых.

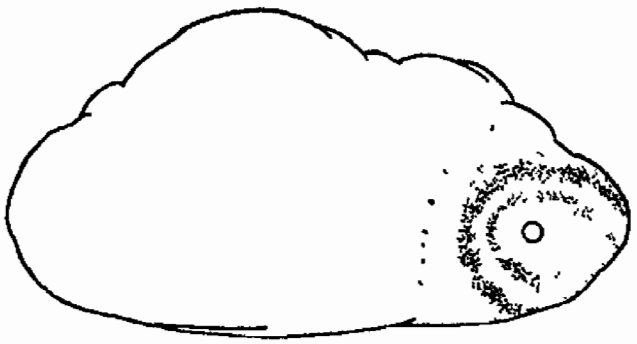


Рис 147 Асимметричный венец у края небольшого облака

Когда перед Луной проходят перисто-кучевые или высококучевые облака, можно иногда видеть, как венцы становятся несимметричными и вытянутыми к краю облака всякий раз, когда новое облако проплывает перед Луной (рис. 147). Очевидно, во внешних частях этих облаков капли мельче, чем во внутренних; по-видимому, во внешних частях облака капли уже начали испаряться.

До сих пор мы описывали случаи, когда венцы возникают в облаках, но бывают моменты, когда они наблюдаются и при абсолютно ясном небе. Прекрасные маленькие венцы такого рода вокруг Солнца я наблюдал неоднократно на Иеркской обсерватории (около Чикаго) на фоне голубого неба Их можно наблюдать и вокруг Луны, но при этом остерегайтесь перепутать их с явлениями, происходящими в глазу (§ 180).

Кажется **), что в спокойных районах пылинки, находящиеся в атмосфере, все больше и больше оседают, а те, что продолжают летать в воздухе, не имеют большого разнообразия и могут служить причиной появления венца.

---

*) Visser, Versl Akad Amsterdam **52**, 1943

**) Penndorf en Stranz, Zs. f angew Meteor. **60**, 233, 1943.

## 179. Венцы на оконном стекле

Проходя зимней ночью мимо окон хорошо освещенного кафе, мы часто видим, что люстры окружены цветными кольцами, появление которых обусловлено влагой на окнах. В одних частях окна кольца больше, чем в других. Нередко мы видим лишь ореол, иногда, однако, цветные кольца неожиданно прекрасны; одни стекла как бы всегда создают лучшие венцы, чем другие. Причина в том, что венцы возникают вследствие дифракции света на мелких каплях воды на оконном стекле, и чем однороднее капли по размеру, тем красивее венец. Возможно, что капли конденсируются ровнее на одних сортах стекла, чем на других.

Эти венцы имеют большое сходство с возникающими в облаках, да и способ их образования тот же самый. В одном случае капли, на которых происходит дифракция, находятся на окне, в другом они как частицы облака парят высоко в воздухе. И все же есть различие между венцом на стекле и венцом в облаках: в первом случае источник света окружен темным полем вместо светящегося ореола. По-видимому, это вызывается однородным распределением капель, которые образуются на равных расстояниях друг от друга, в то время как в облаке капли распределяются неравномерно *).

Образование венца на запотевшем окне — более сложное явление. Одно или два внутренних световых кольца возникают в этом случае главным образом благодаря взаимной интерференции света, отраженного от различных капель, находящихся на более или менее одинаковом расстоянии друг от друга. Внешние же световые кольца возникают, напротив, от каждой из отдельных капель, и их расположение определяется более или менее одинаковой величиной этих капель.

Если смотреть на окно под все бóльшим углом, мы увидим, что форма венца сначала становится эллиптической, затем параболической, а в конце концов даже гиперболической. Если бы условия были такими же, как при горизонтальной радуге (§ 145), мы должны были бы сказать: «Венцы, как они вырисовываются на оконном стекле, имеют эллиптическую форму и т. д.; но глаз видит их лежащими на конической поверхности, осью которой служит прямая глаз — лампа, и проектирующимися в виде кругов». В данном случае, однако, условия совершенно другие. В проекции перпендикулярно взгляду венцы действительно становятся эллиптическими: они приобретают бóльшую протяженность в горизонтальном направлении, очевидно, потому, что каждая капля в этом направлении представляется сжатой, т. е. эллиптической. В то же время это означает, что частица, на которой происходит дифракция, не сферическая, но

*) Donle, Ann. d. Phys **34**, 814, 1888; K. Exner, Sitz. Akad. Wien **76**, 522, 1877; **98**, 1130, 1889; J. A. Prins. Hemel en Dampkring **38**, 244, 1940; J. J. Reesinck en D. A. de Vries, Physica **7**, 603, 1940.

полусферическая или имеет форму шарового сегмента. В направлении, в котором проекция капли наименьшая, венец будет наиболее протяженным.

На затуманенном окне можно также видеть венец вокруг отражения Солнца; строго говоря, такое явление на небе видеть нельзя, но оно лишь очень незначительно отличается от настоящего венца.

Насыпьте тонкий слой порошка ликоподия (им в аптеках пересыпают пилюли) на небольшой кусок стекла. Посмотрите сквозь это стекло на электрическую лампу с расстояния не меньше 10 *м*. Вы увидите лампу окруженной великолепным венцом. Только с этим порошком можно наблюдать венцы. Дело в том, что споры ликоподия, будучи все приблизительно одинаковой величины, и ведут себя одинаково, в то время как частицы вещества, неправильные по форме и различные по размерам, создают «смесь» больших и малых венцов. Если вы держите стекло наклонно, венец в проекции не меняется, отличаясь этим от венца, возникающего на затуманенном окне. Поле вокруг источника светлое, а не темное, как следовало бы ожидать, из-за неодинаковых расстояний между спорами ликоподия.

Если вы подышите на оконное стекло с расстояния в *30—60 см*, а затем будете изучать образовавшийся венец, вы увидите, что венец не увеличивается в величине при испарении влаги; это показывает, что капли становятся постепенно менее выпуклыми, но по-прежнему сохраняют тот же периметр.

Часто через такие стекла можно видеть венцы с совершенно необычной последовательностью цветов. От источника света цвета распределяются в следующем порядке: темный и бледно-зеленый — красный — желтый — зеленый; темно-красный — коричневый — белый. Такое распределение возникает, когда капли на стекле сравнительно велики. Они не действуют больше, как непроницаемые частицы, и прошедшие через них лучи тоже принимают участие в явлении интерференции. Такие аномальные венцы, естественно, не наблюдаются в отраженном свете.

При низкой температуре венцы видны также иногда на замерзших окнах; ореол (по коричневому краю) имеет радиус около 8°.

Может быть, это даже не венец, а гало! У кольца внешний край синий, а внутренний красный. Кажется, что ледяные кристаллы действуют подобно призмам.

Проследите венец, который в зимний день возникает в облачке, образующемся от вашего дыхания; коричневый край имеет радиус от 7 до 9°.

Удивительно красивые венцы можно наблюдать над чашкой чая *). Чашку нужно осторожно до краев наполнить горячим чаем (или водой) с температурой от 40 до 65° Ц.

---

*) Visser, Hemel en Dampkring 38, 109, 1940.

Этот опыт нужно проводить, когда Солнце находится низко над горизонтом с тем чтобы через облако пара, который поднимается над золотистой жидкостью, наблюдать это явление, которое становится видимым, если Солнце бросает свои лучи на чашку под малым углом. Находясь от чашки на некотором расстоянии, можно заметить, как каждый клубок пара начинает приобретать прекрасные цвета. Особенно хороши при этом пурпуровый и зеленый цвета. Можно несколько приблизить глаза к облачку с тем, чтобы избежать смешения цветов.

Измерьте венцы, образующиеся при помощи порошка ликоподия, высчитайте величины зерен и проверьте при помощи микроскопа.

### 180. Световые венцы, возникающие в глазу *)

Ночью я вижу слабый световой круг возле дуговой электрической лампы или другого яркого источника света, хорошо выделяющийся на темном или черном фоне; такие же круги видны вокруг Луны, если небо ясно, и вокруг Солнца, когда свет его вдруг прорывается сквозь плотную листву дерева. Диаметр этого светового круга составляет приблизительно 6°. Он синий к центру и красный у периферии; таким образом, его следует приписать дифракции, но не преломлению. Он очень сходен с венцом на облаках, однако здесь есть и существенное отличие. Если Луна только что скрылась за углом дома, «облачный венец» остается видимым, в то время как «глазной» исчезает сразу, как только заслоняется источник света. Очевидно, он возникает в самом глазе, т. е. это явление энтоптическое.

Может ли такой венец возникать в глазу на малых зернах, приблизительно одинаковой величины, на которых свет дифрагирует так же, как на порошке ликоподия и на водяных каплях в облаке? Это действительно верно по отношению к некоторым людям.

Многие наблюдатели, однако, видят небольшие венцы, первый из которых — яркое туманное кольцо — имеет диаметр порядка 1°,5. Они возникают вследствие дифракции на ядрах клеток роговицы и оболочках хрусталика. В этом случае мы имеем дело не с дифракцией на отдельной частице, но с взаимодействием между большим числом частиц, находящихся приблизительно на одинаковом расстоянии друг от друга (порядка 0,03 *мм***)). Другие, напротив, видят несколько более широкие кольца, которые увеличиваются, если глаз подвергнуть действию паров осмиевой кислоты (осторожно!): в этом случае клетки роговицы несколько набухают и выпячиваются, и дифракция увеличивается. Один из наблюдателей дает следующие

*) См. E. Gullstrand; в книге Helmholtz. Physiologische Optik, 3-е изд., I, 192.

**) L. Ronchi, Toraldodi Francia, Zoli и др. в Atti Fundaz «Giorgio. Ronchi», 1951—1955.

размеры такого венца: красный край ореола радиусом 1°23′; сине-зеленое кольцо — 3°46′; красное кольцо — 4°22′.

Третий тип энтоптического венца, тот, который вижу я, по-видимому, наиболее обычен. Тот факт, что я иногда в продолжение недель вижу *определенные секторы* венца с необычайной ясностью, свидетельствует, что объяснение здесь должно быть другим, чем для «облачного венца». Трудно понять, как такой венец мог бы возникнуть при дифракции на малых частицах. Возьмите кусок бумаги с отверстием диаметром 2 *мм* и держите его перед зрачком вашего глаза, сначала против самого центра, а затем все более и более сдвигая отверстие к краю зрачка; теперь останутся лишь две части венца, а именно слева и справа от источника света в момент, когда отверстие будет против нижней части зрачка. Если отверстие находится перед правой или левой частью зрачка, видны лишь участки венца под и над источником.

Отсюда мы заключаем, что рассматриваемый венец возникает при дифракции на располагающихся радиально волокнах, быть может в хрусталике, поскольку это объясняет все детали опыта. Использование малого отверстия дает надежный метод для отличия этого третьего типа энтоптического венца от двух других. Если дифракция происходит на зернах, а не на волокнах, экранирование сделает венец слабее, но не изменит его формы и величины.

Иногда я почти не вижу венца, если я не смотрю косо вверх или если я не очень утомлен. В другое время я вижу его отчетливо.

Подобные наблюдения помогают выяснить, в какой именно части глаза образуется венец. Он возникает ночью в момент, когда я смотрю на уличный фонарь, но через несколько секунд исчезает. Я заметил, что это связано с сужением зрачка, когда адаптированный к темноте глаз внезапно попадает на яркий свет. Поэтому, просыпаясь среди ночи и внезапно видя горящую свечу или лампу, мы видим вокруг них яркий венец*). Кажется вероятным, что венец возникает во внешних частях хрусталика и поэтому тотчас исчезает при сужéнии зрачка.

При таких дифракционных явлениях, происходящих на зернах или волокнах глаза, связь между углом дифракции и величиной частиц сложнее, чем обычно**).

## 181. Зеленое и синее Солнце***)

Один наблюдатель сообщил нам, что однажды, когда он смотрел на Солнце сквозь столб пара, извергавшегося из трубы паровоза, Солнце трижды становилось ярко-зеленым; в другие моменты

*) Ср. сходное наблюдение Декарта, упомянутое в «Теории цветов» Гете.
**) H. Salomonsohn, Arch. Anat. u. Physiol., Physiol. Abt., S. 187, 1898.
***) Nature **37**, 440, 1888; Quart. Journ. **61**, 177, 1935.

клубы пара вообще не оказывали никакого действия Я также однажды заметил подобный эффект во время отправления местного поезда Паровоз (очень старой модели) извергал облака пара, которые на мгновение затемняли низкое Солнце, пока не рассеивались в воздухе В те моменты, когда Солнце можно было увидеть вновь, его цвет был иногда светло-зеленым, иногда бледно-синим, или один цвет переходил в другой Через доли секунды свет становился настолько резким, а облако настолько тонким, что уже ничего нельзя было увидеть

Явления, подобные этим, возникают, когда капли воды, из которых состоит пар, очень малы: от 1 до 5 *мк* Здесь уже неверно описывать их действие на свет, заменяя водяные капли малыми отверстиями или непрозрачными дисками, на которых происходит дифракция Приближенно это явление можно рассматривать, исследуя сочетание дифракции, отражения от поверхности и прямого пропускания света*)

Туман, состоящий из мелких капелек, можно получить и в лабораторных условиях Как только рассеивающий слой будет иметь достаточно большую толщину, мы кроме венцов сможем увидеть окрашенным и сам источник света

Зеленый, бледно-синий и лазурный цвета Солнца и Луны не раз наблюдались часами и в отсутствие какого-либо пара, например во время песчаных бурь Лучше всего они были видны в годы, следовавшие за знаменитым извержением Кракатау (1883 г)**) Мы знаем, что временами в верхние слои атмосферы извергаются грандиозные количества чрезвычайно тонкой вулканической пыли Требуются годы, чтобы эта пыль осела, а тем временем она, распространяясь по всему свету, вызывает повсюду великолепные восходы и закаты Солнца Можно предположить, что пылевые облака в какой-то момент состоят из очень тонких зерен одинаковой величины, это могло бы объяснить поразительные цвета Солнца

Голубое Солнце 26—28 сентября 1951 г наблюдалось по всей Западной и Центральной Европе Солнечный свет был тусклым, цвета индиго, близ горизонта Солнце становилось не желтым, а белесым Луна и даже звезды показывали синеватую окраску Вскоре была обнаружена и причина — гигантское облако тончайших маслянистых капель диаметром всего лишь в 0,5 *мк*, пришедшее вместе с частицами копоти из канадского штата Альберт, где были лесные

---

*) C Barus, Amer Journ Sc **25**, 224, 1908 R Mecke, Ann d Phys **61** 471, 1920 **62**, 623, 1920 Работа Блюмера (H Blumer Zs f Phys **32**, 119, 1925 **38** 304, 1926) показала однако, как осторожно следует относиться к таким приближениям Van de Hulst, Recherches Obs Utrecht **11**, 1946, Light Scattering by small Particles, 1957, есть русский перевод Хюлст Г. ван де, Рассеяние света малыми частицами ИЛ 1961

**) Kiessling, Meteor Zs **1**, 117, 1884, Nature, 1883

пожары За четыре дня облако достигло Европы, наблюдения с самолетов показали, что облако простиралось до высоты 13 000 *м* *)

К той же группе явлений можно отнести наблюдавшийся однажды аномальный венец **) яркий желто-зеленый ореол был окружен широким красным кольцом, которое в свою очередь было окружено синим, в то же время были видны и зеленые кольца Объяснение можно найти в очень малой величине капель тумана

На редкость таких явлений указывает английская народная присказка «Однажды при синей Луне»

## 182. Глория (фотография XVI ***))

Стоя на вершине холма, когда Солнце низко, мы можем иногда видеть нашу тень вырисовывающейся на слое тумана В этом случае голова тени будет окружена *глорией* — сиянием с такими же яркими цветами, как у венцов вокруг Солнца и Луны Однажды наблюдалось сияние, насчитывающее пять порядков (см § 177) Заметим, однако, что хотя каждый видит и свою собственную тень, и тени своих спутников, если они достаточно близки и туман достаточно далеко, глорию можно видеть только вокруг *своей* головы

Рис 148 Глория наблюдаемая вокруг самолета.

Глорию можно наблюдать и при свете уличного фонаря, если только фон достаточно темен

Летя по направлению к Солнцу над ровным слоем облаков, летчик часто видит тень самолета на облаках, окруженную цветными кругами Иногда можно видеть, как круги внезапно сжимаются и потом снова расширяются Это зависит от величины капель в облаке

В том месте, куда самолет отбрасывает свою тень, можно с первого взгляда определить, где находишься около головной части или у хвоста самолета, поскольку центр ореола всегда указывает наблюдателю точку, противоположную Солнцу (рис 148) Часто можно видеть также размытую дугу значительно большей величины Она

---

*) W Gelbre, Zs f Meteor **5**, 82, 1951, P Wellmann Zs f Astrophys **28**, 310, 1951, Marine Observer **21**, 167, 1951, Wilson, Month Not. Roy Astr Soc **111**, 478, 1951

**) H Kohler, Meteor Zs **46**, 164, 1929

***) W Schmidt, Meteor Zs **33**, 199, 1916, W Milch, Meteor Zs **43**, 295, 1926, Diem, Ann Hydrodin. **70**, 142, 1942, Ahrenberg, J Optic Soc Amer **38**, 481, 1948

почти всегда белая и только края ее бывают немного окрашены; это — белая радуга (§ 144).

Удовлетворительное объяснение глории долго отсутствовало. Сходство с венцом привело многих к заключению, что облако водяных капель каким-то образом рассеивает свет Солнца в том направлении, откуда он приходит, и что возвращающиеся лучи дифрагируют затем на других каплях подобно тому, как в венцах дифрагируют прямые лучи. Однако теперь доказано, что глория возникает непосредственно при рассеянии света назад *).

Радиус глории часто меняется; очевидно, в некоторых местах туман состоит из бóльших капель, чем в других. При только что поднявшемся тумане глория очень велика: вычисленная величина капель тумана не превышает 6 *мк*. Чаще всего их величина оказывается около 15—25 *мк*. В одном исключительном случае глория наблюдалась с самолета на фоне песчаной бури в пустыне **).

Глория часто бывает окружена белой радугой; радуга появляется всегда, когда расстояние от нашего глаза до тумана превышает 50 *м*. Интересно, что радуга кажется гораздо дальше от нас, чем глория ***); это — чисто психологический эффект.

Одновременность этих двух явлений доказывает нам, что глория обязана возникновением водяным каплям, а не ледяным кристалликам. Интересно отметить, что температура в слоях облаков, где образуется это явление, ниже точки замерзания воды на несколько градусов. Следовательно, капли в облаке должны быть переохлаждены.

Теория глории, хотя и не вполне удовлетворительная, указывает, что явление глории должно кое в чем отличаться от венца. Это подтверждается наблюдениями: 1) первое темное кольцо глории размыто и его диаметр меньше; 2) внешние кольца заметно ярче; 3) сильная поляризация, которую можно наблюдать почти при любом полете с помощью кусочка поляроида; радиальные колебания оказываются значительно сильнее.

Лесник, идущий к западу долиной
Зимой, над троп овечьих паутиной,
Где соткан мглой сверкающий туман,
Перед собой вдруг призрак увидал.—
Вкруг головы у призрака сиянье,—
Не ведая, что то его созданье,
Его же тень, он бросился за ней.

(S. T. Coleridge: Constancy to an Ideal Objekt)

---

*) Naik, Noshi, J. Optic. Soc. Amer. **45**, 733, 1954. Основную теорию дал ван де Хюлст: J. Optic. Soc. Amer. **37**, 16, 1947; Light Scattering, 1957 (см. примечание на стр. 230).

**) La Météorologie, № 34, 1954, p. 171.

***) Tyndall, Phil. Mag. **17**, 244, 1883.

## 183. Радужные (иризирующие) облака *) (фотография XVII)

Тот, кто не привык наблюдать небо, будет удивлен, узнав, что облака могут быть светящимися яркими цветами: зеленым, пурпурно-красным, синим и т. д. Эти цвета не имеют отношения к сумеречным явлениям: они наблюдаются и тогда, когда Солнце низко, и тогда, когда оно высоко. Эти цвета беспорядочно разбросаны среди облаков в виде окрашенных краев, пятен и полос. Некоторые наблюдатели подчеркивают, что они имеют «металлический» блеск; что бы это могло значить? При виде этих облаков мы испытываем чувство глубокого восхищения, которое трудно описать, но легко объяснить грандиозностью явления, чистотой цветов, их нежными переливами, их сиянием. Невозможно отвести глаза от этого великолепного зрелища.

Такие иризирующие облака появляются во все времена года, но особенно часто осенью. Они появляются около Солнца, и на расстоянии меньше двух градусов от него кажутся ослепительно белыми. Сквозь темное стекло — это лучший способ наблюдения— их можно видеть на расстоянии от 3 до 10°, а незащищенным глазом — от 10 до 30° от Солнца. Чаще всего они пурпурно-красные или желтые и становятся бледнее с увеличением расстояния от Солнца. Очень немногие наблюдатели видели радужные облака на значительном расстоянии от Солнца (до 50°) и даже около противоположной Солнцу точки.

Интенсивность света нередко столь велика, что невыносима для многих наблюдателей. Следует всегда наблюдать в тени дома или дерева или пользоваться предохранительными средствами, указанными в § 177.

После того как я пристально разглядывал радужные облака в течение долгого времени, не применяя ни одного из этих способов, я иногда наблюдал, что у меня перед глазами происходит пляска пурпурного и зеленого цветов, которые сохраняются как последовательные образы при очень сильных световых впечатлениях (§ 103). Поскольку это преобладающие цвета радужных облаков, я подумал — не является ли все это явление следствием утомления глаз. Однако это не так: два различных наблюдателя видят одни и те же цвета, цвета остаются видимыми и тогда, когда свет ослаблен одним из указанных выше способов; наконец, иризация нередко видна на сравнительно слабо освещенных облаках.

Краски облаков можно различить практически всегда, если облачность не сплошная. Цветовые оттенки отсутствуют только в

*) H. van der Linden, Hemel en Dampkring **1**, 3, 248, 1903; A. Bracke, Nuages irisés, Mons, 1907; Ch. F. Brooks, Month. Weather Rev. **53**, 49, 1925; Zs. f. angew. Meteor. **60**, 185, 1943; H. Köhler, Meteor. Zs. **46**, 161, 1929 дает шаткую теорию.

том случае, если Солнце низко или небо абсолютно белое, а не синее.

Кучевые, кучево-дождевые и слоисто-кучевые облака показывают иризацию лишь на краях, но свет здесь столь слепящий, что, не пользуясь отражением в черном стекле или чем-либо подобным, наблюдать их чрезвычайно трудно; а кучевое облако, когда оно тает, проходя перед Солнцем,— это великолепное зрелище! Однако остается вопрос — действительно ли цвета этой группы можно рассматривать как настоящую иризацию?

Самой красивой иризацией обладают сверкающие белые перисто-кучевые и высококучевые облака, особенно имеющие линзообразную форму, которые быстро возникают до или после бури. Цвета располагаются лентами, полосами и «глазками». Радужность видна и тогда, когда облако быстро меняет форму незадолго до или тотчас после бури.

Ценные указания на происхождение цветов дает порядок их расположения. На первый взгляд распределение цветов кажется беспорядочным, но через некоторое время мы начинаем обнаруживать некоторую закономерность. Распределение цветов в облаках на некотором расстоянии от Солнца определяется, по-видимому, структурой облака: определенные прожилки сохраняют цвет по всему облаку или вокруг всего облака видна пурпурно-красная кайма и т. д. Если облако близко к Солнцу, главным фактором служит расстояние. Отмечалось, например, что облака начинают показывать радужные цвета каждый раз, когда они попадают в определенную часть неба, или что цвета располагаются более или менее правильными кольцами вокруг Солнца.

Раньше считали, что радужные облака — не что иное, как части венцов.

Совершенно другое объяснение было дано недавно. Особый металлический блеск, возможно, вызывается присутствием множества тонких ледяных пластинок *). В рое таких пластинок, переносимых турбулентными течениями воздуха, только пластинки, находящиеся в определенном положении, будут отражать солнечный свет в направлении нашего глаза. Если часть света отражается передней стороной пластинок, а часть — задней, возникает интерференция: некоторые цвета исчезают, некоторые выделяются ярче (ср. § 177). Наблюдаемые цвета не насыщены. Это показывает, что ледяные пластинки должны иметь толщину в 4—5 раз больше длины световой волны, т. е. около 2 *мк*. Распределение цвета по облаку определяется изменениями средней толщины пластинок. Лишь те облака показывают иризацию, в которых ледяные пластинки имеют почти одинаковую толщину.

---

*) H. Dessens, Ann. Géophys. 5, 264, 1949.

Радужные облака на расстояниях больше 30° от Солнца особенно интересны. То, что принимают за иризацию, часто может быть частью гало. Но есть наблюдения, не вызывающие сомнений — я знаю это по моему собственному опыту.

Свет радужных облаков неполяризован.

Радужные облака наблюдаются вокруг Луны, хотя и реже, чем вокруг Солнца. Цвета их более слабы, очевидно, из-за очень малой освещенности. Известен случай когда иризация наблюдалась в искусственных облаках от самолета, писавшего на небе рекламу.

## 184. Перламутровые облака *)

Существует очень редкий и замечательный вид радужных облаков, представляющий собой явление гораздо большего масштаба, чем обычные формы. Вся гряда облаков переливается радужными цветами, как рыбья чешуя, показывая иногда восхитительные чистые тона. Эти тона особенно хороши перед самым заходом Солнца на расстоянии 10—20° от него. Отличительное свойство этих облаков — в том, что они остаются видимыми в течение двух часов после захода Солнца — факт, который указывает на большую их высоту **). Недавно более точными методами их высота была определена в 25 *км*, в то время как обычные облака никогда не поднимаются выше 12 *км*. Из-за большой высоты этих облаков кажется, что они передвигаются очень медленно; в действительности же они несутся со скоростью от 10 до 90 *м/сек*. Когда перламутровые облака темнеют, они совершенно внезапно, приблизительно за четыре минуты, погружаются в темноту. Это — интервал времени, необходимый для того, чтобы диск Солнца скрылся под горизонтом. Таким образом, кажется весьма вероятным, что эти облака освещаются не сумеречным светом, а прямым светом Солнца.

Расположение цветов в них зависит почти полностью от части облака. Иногда эти облака испещрены полосами, волнисты и напоминают перистые, иногда вся облачная гряда почти одного цвета с цветами спектра вдоль краев или длинных горизонтальных «весел», между которыми можно видеть необыкновенный опаловый фон неба. Цвета порой остаются постоянными, порой постепенно меняются. Они исчезают, когда расстояние облака от Солнца превышает 40°. Вся картина сказочна и неописуемо прекрасна.

Если смотреть на облака сквозь николь, то цвета при вращении николя будут меняться. Однажды на этих перламутровых облаках

---

*) Mohn. Vid. Selsk. Forh. Christiania, № 1, 1893; C. Störmer, Geofys. Publ. **9**, № 4, 1931; Beitr. z. Geophys. **32**, 63, 1931; Nature **145**, 221, 1940; Weather **3**, 13, 1948; H. Wehner, Meteor. Rundsch. **4**, 180, 1951.

**) Их высота определяется по продолжительности их освещения; точные вычисления см. Mohn, Meteor. Zs. **10**, 82, 1893, а также Jesse, там же **3**, 1886.

наблюдалось гало; это указывает, что они, вероятно, состоят из ледяных кристаллов (ср. § 156). Во многих случаях, когда иризирующие облака наблюдались на высотах 4000—11 000 *м*, где температура ниже —50° Ц, кажется очень вероятным, что явление возникает на ледяных иглах или пластинках, а не на водяных каплях. Они часто образуются тотчас после прохождения циклона, когда небо совершенно чисто. В Осло такие облака обычно наблюдаются зимой, когда на севере или на востоке находится глубокий циклон, тогда как над Атлантическим океаном свирепствует шторм и дует теплый сухой ветер (фён). В такие моменты небо совершенно чистое и хорошо наблюдаются самые высокие слои облаков.

Необыкновенно красивые перламутровые облака наблюдались 19 мая 1910 г.— в тот день, когда Земля прошла через хвост кометы Галлея. Можно думать, что между этими двумя явлениями есть связь. Следовало бы также подумать о проникновении космической пыли в нашу атмосферу *).

## НИМБЫ

### 185. Нимбы на росистых лугах **) (фотография XVIII)

Ранним утром, когда Солнце еще низко и отбрасывает длинные тени на траву, покрытую росой, мы замечаем удивительный неокрашенный световой ореол, окружающий сверху и сбоку тень нашей головы. Это не оптическая иллюзия и не явление контраста: когда та же самая тень падает на гравиевую дорогу, ореол исчезает.

Явление красивее всего, когда длина тени по крайней мере 15 *м* и она падает на низкую траву или клевер, серовато-белые от обильной росы. При таких обстоятельствах нимбы очень отчетливы. Они менее четки днем после ливня или ночью в свете ярких электрических ламп. Если возникает сомнение, действительно ли это нимбы, лучший способ проверки:

1. Осмотреть весь луг и заметить, как увеличивается яркость у вашей тени.

2. Сделать несколько шагов: вы увидите, что световое сияние движется вместе с вами и места, где трава не была особенно яркой, освещаются, когда подходит ваша тень.

3. Сравните вашу тень с тенью других людей; вы увидите нимб только вокруг вашей головы. Это может дать повод к некоторым философским заключениям. Когда Бенвенуто Челлини, знаменитый итальянский скульптор XVI в., заметил этот ореол, он решил, что сияние было знаком его собственного гения!

---

*) S l o c u m. J. Roy. Astr. Soc. Canada **28**, 145, 1934, с прекрасными фотографиями.

**) Quart. Journ. **39**, 157, 1913; E. M a e y, Meteor. Zs. **39**, 229, 1929.

Каково объяснение этого интересного явления? Капли росы определенно играют важную роль, поскольку, когда роса испаряется, нимб практически исчезает; он появляется снова, если траву обрызгать водой.

Наполните сферическую стеклянную колбу водой и поместите ее на солнечный свет; она будет изображать в большом масштабе каплю росы. Держите позади колбы лист бумаги, изображающий лист травы, на котором образуется роса. Посмотрев на колбу по направлению, образующему малый угол с направлением падения лучей, мы увидим ее ярко освещенной, если бумага находится на небольшом расстоянии от нее (близко к фокусу линзы-колбы).

Этот опыт приводит нас к предположению, что каждая капля росы, лежащая на листке травы, образует на этом листке изображение Солнца, и что лучи от изображения идут почти по тому же пути, что и падающие, т. е. в направлении Солнца (рис. 149,*а*). Так можно объяснить, почему капли кажутся излучающими свет, подобно глазам

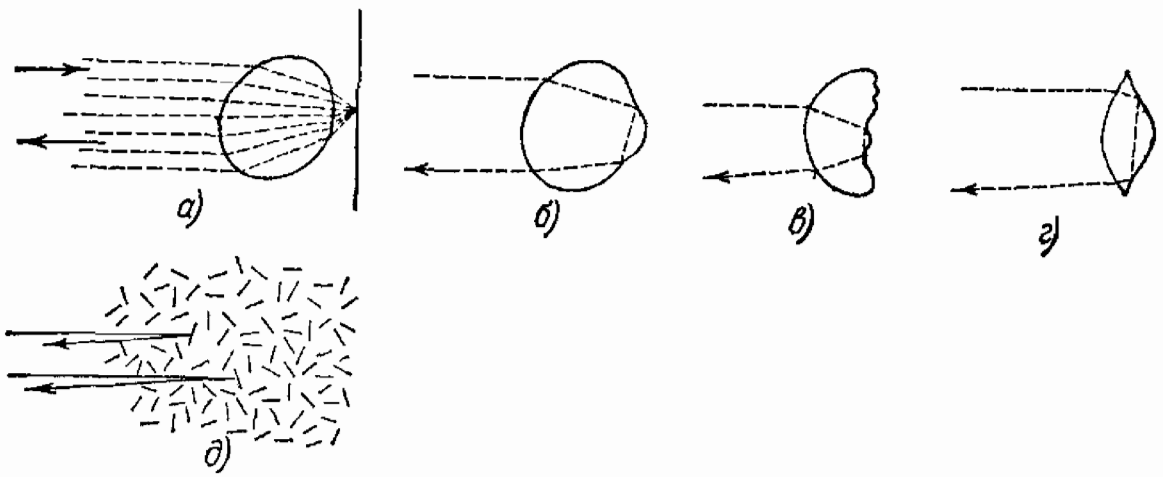



Рис. 149. *Нимбы на росистой траве.*

кошки. Это объясняет, почему так много света приходит в направлении, близком к противосолнечной точке, и почему интенсивность света быстро падает, если посмотреть дальше от нее. Но почему тогда свет от травы не зеленый?

Здесь должны действовать другие причины. Если мы снова посмотрим на нашу колбу, мы увидим, что ее передняя поверхность так же хорошо отражает свет, как и задняя. Простое вычисление показывает, что яркость отражения от задней поверхности составляет примерно половину яркости света, излучаемого листом, и одну восьмую отраженного от передней поверхности.

Однако гораздо более сильный свет, испытавший полное внутреннее отражение, идет от горлышка и плоского дна колбы. И поскольку капли росы имеют, в особенности на покрытых пушком растениях, неправильную форму (рис. 149, *б*, *в*, *г*), очень похоже, что для них это наиболее важный фактор: отраженный свет также ярок и бел, как

и свет, идущий от Солнца. Однако эта вторая группа отраженных лучей не показывает определенной склонности к отражению в направлении падающего света.

К счастью было сделано следующее остроумное наблюдение: переизлучают свет только те листья травы, на которые падает прямой свет Солнца, т. е. те, которые со стороны Солнца не заслонены другими листьями; в то же время в других направлениях они в большинстве случаев заслоняются другими листьями (рис. 149, *д*). Теперь становится понятным, почему наблюдатель всегда видит больше света, если его взгляд более или менее совпадает с направлением падения света. Этот удивительно простой принцип (выдвинутый Зеелигером и Ричарзом) был применен в астрономии для объяснения распределения света в кольцах Сатурна которые, как известно, состоят из небольших глыб.

## 186. Нимбы на поверхностях без росы

Это явление наблюдать гораздо труднее, и методы, описанные в § 185, оказываются очень полезными. Оно наблюдается на сжатом поле, на короткой траве и даже на неровной земле; я видел его совершенно отчетливо, когда Солнце было низко над горизонтом, на хорошо подстриженном лугу, на котором все листья травы стояли вертикально и были одинаковой длины, а еще более ясно — на лужайке синявки.

Если наблюдатель находится в нескольких сотнях метров от луга, его тень видна настолько смутно, что в большинстве случаев неразличима (ср. § 2) и единственное, что бросается в глаза, это нимб в виде светового пятна около 2° диаметром удлиненного по направлению к нам*).

Объяснение такое же, какое было дано Винтерфельдом нимбам на росистых лугах (ср. § 185). Солнце освещает большинство стебельков сквозь промежутки в расположенных перед ними рядах; смотря более или менее в направлении солнечных лучей, мы видим все малые освещенные поверхности; если же посмотреть под большим углом, мы увидим много затененных листьев и средняя яркость, таким образом, будет меньше.

Яркие нимбы можно часто видеть на мари белой (*Chenopodium album*). Это растение покрыто мучнистым слоем шаровидных клеток, которые, очевидно, действуют так же, как капли росы, и очень сильно развиты у определенных разновидностей этого вида**).

---

*) Nature **90**, 621, 1913.

**) V. L o m m e l, Ann. d. Phys., 1874, Jubelband 10.

## 187. Нимб вокруг тени воздушного шара*)

Каждый летавший на воздушном шаре, следил за тенью корзины, скользящей по Земле. Почти всегда она окружена световым ореолом; тот факт, что этот ореол не возникает субъективно вследствие контраста, доказывается увеличением его яркости на полях и лугах, покрытых росой.

На зерновых полях он превращаеся в вертикальный световой столб, параллельный стеблям растений. Это особенно красивая форма нимба, так как из-за большого расстояния между шаром и Землей мы смотрим под чрезвычайно малым углом к лучам Солнца. Если тень плывет по гряде облаков, может представиться случай увидеть великолепные цветные кольца глории (§ 144, 182).

Доктор Ф. Уиппл (Гарвардская обсерватория, США) пишет мне, что он много раз наблюдал это явление с самолета над самыми разнообразными местностями, красивее всего над осенними лесами**). Вместо тени образовывалось яркое пятно поперечником около 2°. Оно наблюдается даже в пустыне, лишь над водной поверхностью оно превращается из светлого в темное. На росе пятно увеличивается.

---

*) C. F l a m m a r i o n, L'Atmosphère, p. 232, 1888; Meteor. Zs. **30**, 501 1914; Deutsche Luftfahrer Zeitung **17**, 83, 1913.

**) См. также B u t l e r, J. Optic. Soc. Amer. **45**, 328, 1955.

# СВЕТ И ЦВЕТ НЕБА

## 188. Рассеяние света дымом

Мы начнем наши наблюдения над рассеянием света, прогуливаясь вдоль оживленного канала. Множество проходящих судов с нефтяными или бензиновыми двигателями извергают дым, который на темном фоне кажется синим. Если, однако, дым виден на светлом фоне неба, он кажется уже не синим, а желтым. Ясно, что синева дыма не есть внутреннее свойство вещества, как, например, синева синего стекла; цвет дыма зависит от условий освещения. Объяснение таково: на темном фоне дым освещается лучами Солнца, приходящими со всех сторон, но не сзади. Эти лучи рассеиваются дымом во всех направлениях, некоторая часть рассеянного света попадает в наш глаз и делает дым видимым. Частицы, образующие дым, рассеивают синий свет гораздо сильнее, чем красный или желтый; поэтому мы и видим дым синим. С другой стороны, когда фон ярок, мы видим дым в проходящем свете, и он кажется желтоватым, так как синий свет из падающего белого света рассеивается во всех направлениях, и ослабляется, почти не доходя до нашего глаза. Только желтый и красный сохраняются в проходящем свете; они-то и создают окраску дыма.

«В прошлые годы я часто видел нечто подобное в Килларни (Ирландия), где в безветренные дни столбы дыма поднимаются над крышами домов. Нижняя часть каждого столба видна на темном фоне сосен, а верхушка — на светлом фоне облаков. Нижняя часть была синей, потому что она была видна в рассеянном свете, верхушка была красноватой, так как она была видна в проходящем свете (Дж. Тиндаль).

То же явление синего цвета в рассеянном свете и желтого в проходящем можно очень ясно видеть в дымках дизельных поездов, когда поезд трогается с места, и дизель-моторов грузовиков и автобусов. Это явление можно видеть и осенью, когда сжигают сухие листья, сорную траву и мусор, и в дыме из нашей собственной дымовой трубы, если топят дровами.

Во всех этих случаях дым состоит из чрезвычайно малых капель дегтеподобной жидкости, в то время как при сжигании угля образу-

ются гораздо более крупные хлопья сажи. А ведь именно размер рассеивающих частиц по сравнению с длиной волны света $\lambda$ (0,0006 *мм*) определяет цвет дыма. Когда частицы не больше одной или двух десятых длины волны, рассеяние пропорционально $\frac{1}{\lambda^4}$ и, таким образом, быстро растет к фиолетовому концу спектра; рассеяние на столь малых частицах, из чего бы они ни состояли, всегда показывает прекрасный сине-фиолетовый цвет. На больших частицах рост рассеяния к фиолетовой части спектра гораздо менее резок; в этом случае рассеяние пропорционально примерно $\frac{1}{\lambda^2}$. Когда частицы очень велики, зависимость рассеяния от длины волны перестает быть заметной, и рассеянный свет остается белым. Под «очень большими» мы здесь понимаем «очень большие по сравнению с длиной волны» — например, в 0,01 *мм*!

Вот почему дым сигар или папирос синий, если его немедленно выдохнуть в воздух, но становится белым, если его сперва подержать во рту. В последнем случае частицы дыма покрываются водяной оболочкой и становятся много больше.

Пар паровоза синеват непосредственно у выпускного клапана и белый выше, из-за конденсации и роста капель. Отметьте разницу между *дымом* и *паром* паровоза как в падающем, так и в проходящем свете и никогда не смешивайте их!

Мы до сих пор рассматривали рассеяние в сравнительно разреженных облаках дыма; в очень плотном дыму явления сложнее, поскольку там свет испытывает вторичное рассеяние от одной частицы к другой. Следя за дымом, поднимающимся над костром сухих листьев, вы увидите, что край столба восхитительно синий, а ближе к центру, где дым плотнее, столб почти белый.

Легко удостовериться, что свет, приходящий в наш глаз после рассеяния в слоях достаточной толщины, будет всегда белым, хотя свет, рассеянный каждой частицей, может быть синим. Ведь весь свет, падающий на облако дыма, должен в конце концов уйти из него, если только в облаке происходит лишь рассеяние, а не поглощение (§ 189).

Дым из нашей дымовой трубы и дым фабрик вообще черен в падающем свете, хотя столб дыма плотен и непрозрачен. Это показывает, что хлопья сажи не только рассеивают свет, но и сильно поглощают его. Сквозь тонкие слои такого дыма небо кажется коричневым, и все же цвет дыма в рассеянном свете может быть смело назван синеватым. Коричневый цвет следует приписать поглощению в частицах дыма. Это согласуется с тем фактом, что поглощение частиц углерода быстро увеличивается от красного к фиолетовому концу спектра. Это подтверждается кроваво-красным цветом Солнца, если смотреть на него сквозь дым пожара.

## 189. Синее небо *)

*Над облаками небо вечно сине!*
(*Драхман*)

Земля окружена бесконечной красотой синего неба. Его синева кажется бездонной в этой громадной осязаемой глубине. Разнообразие его оттенков изменяется ото дня ко дню, от одной точки неба к другой.

В чем причина этой удивительной синевы? Не в свете, излучаемом самой атмосферой, потому что тогда она должна была бы светить и ночью. Не в источнике синего света где-то за атмосферой, потому что ночью мы видим великолепие того черного фона, перед которым располагается атмосфера. Причина должна, следовательно, корениться в самой атмосфере. И в то же время это не обычное цветовое поглощение: ведь Солнце и Луна скорее желтые, чем синие. Тогда это наверное должен быть случай, аналогичный очень тонкому дыму. Так мы приходим к предположению, что свет неба есть просто рассеянный свет Солнца! Мы знаем, что рассеяние на малых частицах увеличивается с приближением к фиолетовому концу спектра. Цвет неба действительно содержит много фиолетового (к которому наш глаз не очень чувствителен), изрядное количество синего, немного зеленого и очень мало желтого и красного. Сочетание всех этих цветов и дает небесно-синий.

Что же представляют собой те частицы вещества, которые рассеивают свет в атмосфере? Летом, после долгого засушливого периода, воздух полон бесчисленными частицами песка и пыли, поднятыми ветром и ограничивающими наш кругозор. Временами небо кажется скорее беловатым, чем синим. Но после нескольких сильных ливней, когда дождь вымоет из воздуха пыль, он становится ясным и прозрачным, небо — глубоким и синим. Каждый раз, когда появляются высокие перистые облака, наполняющие воздух ледяными кристаллами, восхитительная синева исчезает, заменяясь гораздо более белесыми оттенками. Таким образом, рассеяние света, окрашивающее небесный свод, не может вызываться ни настоящими пылинками, ни частицами воды и льда. Единственная возможность, — что центрами рассеяния служат *сами молекулы воздуха* — каждая в отдельности, конечно, очень слабым, но вполне достаточным, чтобы слой тол-

---

*) Знаменитый швейцарский геолог Гейм написал блестящую книжку под названием «Luftfarben», Zürich, 1912, в которой он популярно и с чувством описал цвета неба и сумеречные явления. К книге приложены цветные репродукции акварелей. На русском языке имеется подробная монография: Е. В. Пясковская-Фесенкова, Исследование рассеяния света в земной атмосфере, М., 1957.

щиной во много километров получил заметную яркость с определенным преобладанием фиолетового и синего $\left(\text{по закону } \frac{1}{\lambda^4}\right)$.

Солнечный свет, каким мы его видим, теряет синие и фиолетовые лучи, которые рассеиваются в воздухе. Поэтому Солнце принимает слабый желтый оттенок, который становится сильнее, когда Солнце низко, так как тогда его лучи должны пройти сквозь воздух более длинный путь. Его цвет постепенно превращается в оранжевый, а затем в красный, свойственный заходящему Солнцу*).

Знаменитый закон рассеяния Рэлея для частиц, меньших чем 0,1 длины волны света, выражается формулой:

$$s = \text{const} \cdot \frac{(n-1)^2}{N\lambda^4},$$

где $s$ означает рассеяние в единице объема, $N$ — число частиц в 1 $см^3$, $n$ — показатель преломления.

## 190. Воздушная перспектива **)

Далекий лес — превосходный темный фон для наблюдения атмосферного рассеяния. Чем он дальше, тем кажется туманнее и синее. Толстый слой воздуха между нами и лесом, освещенный сбоку лучами Солнца, рассеивает свет, который накладывается на фон, как бы покрывая вуалью расположенные за ним предметы. Поэтому контрасты между темными и светлыми частями смягчены, и фон делается более однородным и более синим. Существование такой *воздушной перспективы* невольно сказывается на нашей оценке расстояния до группы деревьев. Дерево на расстоянии 100 *м* имеет более синеватый оттенок, чем расположенное рядом с нами. Зелень лугов с увеличением расстояния до них удивительно быстро становится сине-зеленой (а затем и синей). Еще прекраснее выглядят в апреле поля с молодыми всходами, которые имеют очень чистый насыщенный зеленый цвет. Далекие холмы часто кажутся синими, как на пейзажах художников XVI в., таких как Ван Эйк и Мемлинг. Дюны вдоль берега между Зандфоорте и Гаарлемом с их пышной растительностью, располагающиеся волнообразно и уходящие далеко в даль, также показывают эту «синюю» прелесть горизонта. Благодаря воздушной перспективе любой оттенок становится несколько синеватым и гармонически сливается с другими; только вблизи красный цвет домов и зелень лугов бросаются в глаза и нарушают гармонию красок. Пронаблюдайте это сами!

---

*) См. J. Plassman, Meteor. Zs. **48**, 412, 1931.

**) A. Heim, Luftfarben (см. § 183); V. Cornish, Geogr. Journ. **67**, 506, 1926; из этой статьи, в частности, заимствован конец § 190.

С другой стороны, в ярком фоне мы можем попытаться обнаружить и другие превращения цветов. В гористой местности интересны покрытые снегом вершины, на равнине — гряды кучевых облаков, ослепительно белые вблизи и постепенно желтеющие вдали.

Все же рассеянный синий свет на темном фоне гораздо заметнее, чем желтое окрашивание ярких частей. В первом случае темнота заменяется небольшим количеством света, во втором — происходит лишь небольшое изменение в уже значительной яркости; относительное различие гораздо меньше (§ 77).

На открытых горизонтах равнинной части Нидерландов воздушная перспектива выступает во всем своем великолепии, и вследствие постоянных изменений влажности синий свет, рассеянный молекулами воздуха, и сильный сероватый свет пасмурного неба преобладают попеременно.

Иногда между двумя ливнями над нами проходит область высокого давления и воздух бывает очень прозрачен и чист. В таком случае воздушная перспектива почти полностью исчезает и сказывается разве только на больших расстояниях. Мы удивляемся тому, как резки очертания ландшафта и как велики контрасты. Темные части ландшафта бывают совершенно черными. Даже у далеких домов и башен удивительно хорошо видны все детали, и их цвета почти не меняются из-за дальности расстояния. Хорошо натренированный глаз различает эти явления уже на предметах, находящихся на расстоянии 100—200 *м*.

В пасмурный день передний план менее богат красками, склоняясь более к серому. Неровности среднего плана выступают сильнее, потому что низины мы видим сквозь более плотный занавес дымки, чем возвышенности (см., однако, § 106).

Гребни холмов, поднимающиеся друг над другом, а также полосы лесов дают всегда прекрасную градацию оттенков, а именно: ближайшие к нам кажутся более темными; те, что расположены дальше, кажутся значительно светлее, потому что мы видим их сквозь пелену тумана, рассеивающего свет. И где-то вдалеке видимость становится, наконец, совсем плохой.

В ясную летнюю погоду, когда барометр стоит высоко, в воздухе находится множество частиц пыли, и небо очень яркое, хотя и не очень синее. Контрасты светотени выражены менее определенно, и, более того, наблюдатель наполовину ослеплен яркостью неба.

Залитый лунным светом пейзаж кажется прекраснее, когда дымка совершенно отсутствует—дымка ослабляет свет, скрадывает контрасты, все становится монотонно серым.

Благодаря воздушной перспективе моряк видит далекий берег вырисовывающимся в легкой голубой дымке в противоположность темной синеве волн, резкие очертания которых выделяются на переднем плане. Далекая с трана кажется ему очарованным царством...

## 191. Свет и цвет в горных районах. Пейзаж, видимый с самолета

Особое очарование горного пейзажа для жителей равнин следует в первую очередь приписать большей чистоте воздуха, чем высоте как таковой. Здесь нет дыма фабрик и больших городов, следовательно, меньше больших частиц пыли, а отсюда — более чистые цвета ландшафта и удивительная воздушная перспектива. Первозданной прелестью тонов пейзажа, все более и более утрачиваемой у нас из-за развития промышленности, в горах можно еще наслаждаться в ее полном блеске. Более того, вследствие бóльшей высоты воздух разрежен и его рассеивающая способность ослаблена. На высоте больше 3000 *м* неопытный путешественник беспрестанно ошибается в оценке расстояний. Сам того не сознавая, он склонен приписывать малое рассеяние близости рассматриваемого пейзажа. С гор мы можем видеть, как лежащий ниже нас воздух, сильно освещенный Солнцем, покрывает долины как бы вуалью; ничего подобного не видят люди в долинах, смотрящие на ярко освещенные вершины гор.

На высотах больше 4000 *м* небо кажется сине-черным, Солнце и Луна приобретают жгучий, почти белый цвет вместо того желтоватого тона, который мы обычно видим. Сверкающие снеговые поля ослепляют, тени — резки и черны. Наблюдая эти резкие контрасты, мы учимся воспринимать во всей полноте красоту мягких и гармоничных пейзажей равнины.

Если наблюдать с самолета, оптические эффекты оказываются до некоторой степени иными. При полете на небольшой высоте свет от пейзажа должен до того, как он попадет в наш глаз, пройти лишь небольшое расстояние в рассеивающем слое воздуха. Дымка, скрадывающая все цвета, пока мы находимся на Земле, практически исчезает, и мы некоторое время видим оттенки во всей их теплоте и чистоте. Это объясняет то особое очарование пейзажа, в котором убеждался каждый, поднимавшийся в воздух. На больших высотах эффекты все более и более напоминают те, какие мы наблюдали в Альпах.

## 192. Почему мы прикрываем глаза рукой. Наблюдения цветов сквозь трубку *)

Обычно, когда человек всматривается вдаль, он сверху прикрывает глаза ладонью. Наша ладонь защищает глаза от света, падающего со стороны. Свет, падающий со стороны, рассеивается внутри глаза, и изображение ландшафта замывается пеленой рассеянного белого света.

Защита от света, падающего со стороны, будет еще более эффективной, если смотреть сквозь неплотно сжатый кулак. Как меняются

*) M. Minnaert, Proc. Acad. Amsterdam **56**, 148, 1953.

все цвета в ландшафте! Это выступает еще отчетливее, когда мы смотрим сквозь картонную трубку с несколькими диафрагмами.

Посмотрите сначала на *соседние* предметы. Все их цвета кажутся более насыщенными и живыми, хвойные деревья — более зелеными. Если вы несколько увеличите отверстие, сквозь которое смотрите, цвета очень быстро поблекнут; это показывает, что рассеяние внутри глаза происходит главным образом под малыми углами. Цилиндр, усиливая цвета, усиливает контрасты и позволяет легче различать предметы: это объясняет привычку держать руку над глазами.

Посмотрите теперь таким же образом на *далекий* ландшафт. Он покрыт дымкой, обычно синеватой, возникающей из-за рассеяния света в воздухе и на тонких зернах пыли. Интересно, что мы обычно не замечаем эту вуаль, смотря на ландшафт в целом. В горах склоны обычно кажутся сероватыми или коричневатыми с разбросанными там и сям зелеными пятнами лесов. Однако сквозь трубку мы различаем, что весь склон в действительности голубой и что леса также голубые; однако горы несколько темнее и более серовато-голубые, лес — скорее зеленовато-голубой. По-видимому, в обычных условиях мы непроизвольно вычитаем общую вуаль из ландшафта. Даже на равнинах оказывается неожиданным, насколько обычно сильна и насколько синяя эта воздушная вуаль. Мы испытываем подобное ощущение смотря сквозь пыльное оконное стекло; вуаль обычно не заметна, если мы не пользуемся трубкой *).

## 193. Опыты с нигрометром **)

Нигрометр — ученое название очень простого инструмента. Это — картонный цилиндр, какие употребляются для посылки рисунков почтой, длиной 50 *см*, диаметром 3 *см*, снабженный крышками с обоих концов. В одной из крышек сделано отверстие диаметром 7 *мм*, в другой — 3 *мм*. Оба конца цилиндра надо обернуть кусками черной бумаги и прибор готов к употреблению.

Работая с этим прибором, следует помещать перед глазом меньшее отверстие. Большее отверстие глаз видит освещенным на почти абсолютно темном фоне. Направьте цилиндр на окно дома, находящегося от вас на некотором расстоянии, и вы увидите, что темное отверстие кажется определенно синеватым — это свет, рассеянный освещенным Солнцем воздухом, который находится между вами и окном. Подойдите к окну. Чем ближе вы подойдете, тем слабее синеватый свет, тем короче рассеивающий столб воздуха. На малых

*) Несколько совершенно непостижимых наблюдений было сделано Холдейн (H a l d a n e, The Philosophy of a Biologist, Oxford, 1935, p. 52). Сквозь трубку цвета казались как бы более желтоватыми, море и небо — почти белыми; когда облако проходило, синий цвет восстанавливался (?).

**) R. W o o d, Phil. Mag. **39**, 423, 1920.

расстояниях лучше направлять нигрометр на ящик, черный внутри и снабженный лишь малым отверстием. Такой ящик представляет собой почти совершенное «черное тело».

Определим теперь длину столба воздуха, рассеивающего так же, как вся толща атмосферы. Возьмите кусок стекла, зачерненный с задней стороны (например, кусок засвеченной фотографической пластинки), и держите его перед половиной отверстия под углом 45° к оси цилиндра. Если можно, выберите направление так, чтобы в цилиндр отражался свет участка неба, удаленного от Солнца на 60° (рис. 150). Сквозь неприкрытую половину отверстия должен быть виден темный проем окна. Как далеко нужно отойти, чтобы увидеть обе половины отверстия освещенными одинаково сильно? Если погода солнечная и ясная, вы найдете, что это расстояние составляет

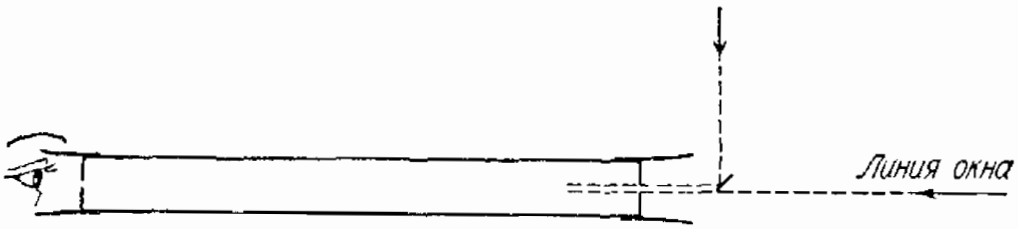



Рис. 150. Наблюдения с нигрометром: измерение атмосферного рассеяния.

около 330 *м*; если солнечно, но несколько туманно, расстояние окажется около 130 *м*.

При отражении кусок стекла снижает интенсивность света до 5% первоначальной (§ 60). Поэтому свет рассеивается небом на расстоянии в 60° от Солнца так же, как столбом воздуха, грубо говоря, в 330 *м* · 20 = 6,6 *км*. Если бы мы могли сжать атмосферу так, чтобы ее плотность по всей ее высоте была равна плотности у поверхности Земли, ее «эквивалентная высота» составила бы 8,8 *км*.

В самом деле, поскольку масса атмосферы над 1 $см^2$ равна $1{,}033 \times 10^3$ *г* и масса 1 $см^3$ воздуха равна 0,001293 *г*, мы получаем для «эквивалентной высоты»

$$\frac{1{,}033 \cdot 10^3}{0{,}001293} = 8{,}8 \ км.$$

Согласие с нашим оптическим определением оказывается не таким уж плохим! Мы можем рассматривать его как доказательство того, что рассеивающие частицы, создающие воздушную перспективу на земной поверхности, имеют ту же природу, что и вызывающие синий цвет неба. То, что наш результат 6,6 *км* несколько меньше, чем 8,8 *км*, можно считать свидетельством более высокого содержания пыли и, следовательно, большего рассеяния в низких слоях атмосферы. Конечно, наше определение во всех отношениях чрезвычайно грубо; трудно ожидать от него большего, чем правильный порядок величины.

## 194. Цианометр (прибор для измерения синевы неба)

Смешайте цинковые белила и сажу с берлинской лазурью или кобальтовой синей в различных пропорциях. Эти смеси не выцветают. Нанеся краску полосами на картон и перенумеровав их, мы получим инструмент для измерения цвета неба. Этот метод особенно часто применяется в путешествиях. Цветовая характеристика различных номеров шкалы может быть определена колориметрически позже. Подобные шкалы могут быть куплены и готовыми.

Работая с этими шкалами, следует стоять спиной к Солнцу, так, чтобы Солнце светило на шкалу.

## 195. Распределение света по небу

Изучите в ясный день при помощи цианометра, если он у вас есть, или нашего нигрометра распределение яркости по небу. Прежде всего внимательно изучите окрестности. Используйте маленькое зеркало, чтобы сравнивать одну часть неба с другой (фотографии XIX и XX), и нанесите линии равной яркости (изофоты) и одинаковой синевы на диаграмму, подобную изображенной на рис. 151; повторите это при различной высоте Солнца. «Со временем тренированный глаз видит ход изофот так, как если бы они были начерчены на фоне неба» *).

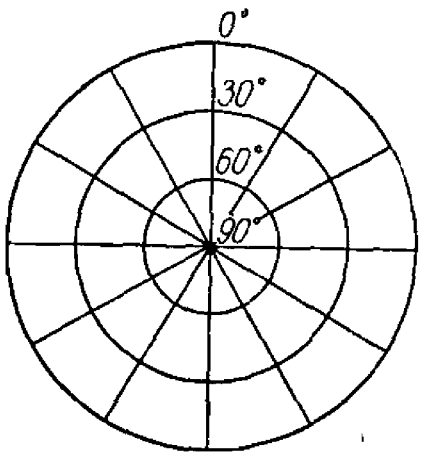



Рис. 151. Диаграмма, на которую наносятся линии равной яркости и равной «синевы» неба.

Теория распределения цвета и света по небу очень сложна. Дело в том, что воздух освещается не только Солнцем, но и голубым небом; кроме того, все явление осложняется наличием в атмосфере пыли и водяных капель, действие которых невозможно учесть точно **).

Наиболее темная точка небосвода всегда лежит на вертикальном круге, проходящем через Солнце, на расстоянии от него около 95°, когда Солнце низко, и около 65°, когда оно высоко. Сквозь эту точку проходит «линия темноты», делящая небо на две части: яркую область, прилегающую к Солнцу, и другую яркую область — противолежащую ему. Форма и величина этих областей меняются в соответствии с высотой Солнца. Мы можем рассматривать распределение света по небу как результат сочетания трех явлений:

1. Вблизи Солнца яркость быстро растет и даже становится ослепляющей, цвет все более и более приближается к белому (нужно стоять в тени строения около конца тени).

---

*) C. Dorno, Physik der Sonnen- und Himmelsstrahlung, S. 116.

**) См. Smosarski, Ann. Géophys 2, 1, 1946; он дает простую теорию. Подробные вычисления см.: Chandrasekhar and Elbert, Trans. Amer. Phil. Soc. 44, 643, 1954.

2. На расстоянии 90° от Солнца небо должно быть наиболее темным и наиболее синим, но

3. сказывается третий эффект: интенсивность света растет от зенита к горизонту, в то же время цвет становится белее. Этот эффект сочетается с двумя указанными выше.

Первое явление очень хорошо поддается измерению при помощи нигрометра. Закроем половину поля зрения куском стекла, покрытого с одной стороны слоем черной краски так, чтобы в нем отражалась часть неба, близкая к Солнцу, и направим нигрометр так, чтобы в другой половине был виден участок неба в 40—50° от Солнца. Меняя направление на несколько градусов в ту или другую сторону, мы легко найдем положение, в котором обе половины поля имеют одинаковую яркость. Изменения в яркости при таких движениях особенно заметны в половине поля, освещенной отражением яркой части неба.

Сама возможность такого уравнивания яркостей приводит нас к заключению, что в точке близ Солнца яркость должна быть по крайней мере в 20 раз больше, чем на расстоянии 45° от Солнца. Такое чрезвычайно сильное рассеяние под малыми углами к направлению падающего света следует приписать плавающим в воздухе сравнительно крупным частицам — пылинкам и каплям. Это согласуется и с тем, что цвет близ Солнца менее синий, а скорее белый или даже желтоватый, подобно самому Солнцу — ведь большие частицы рассеивают все цвета приблизительно одинаково (§ 189).

Второй эффект — это следствие самого закона рассеяния. Под углом 90° рассеяние должно быть приблизительно в два раза слабее, чем в противосолнечной точке. Более того, крупные частицы почти, если не совсем, не рассеивают свет под столь большими углами. Следовательно, то, что мы видим,— это лишь отделенный рассеянием на самих молекулах воздуха чистый синий свет.

Третий эффект возникает главным образом вследствие большой толщины слоя воздуха между нашим глазом и горизонтом. Хотя каждая частица воздуха рассеивает преимущественно фиолетовые и синие лучи, именно эти лучи ослабляются сильнее всего на своем долгом пути от рассеивающей частицы до нашего глаза. Если слой воздуха очень толст, эти два эффекта гасят один другой (§ 189).

Пусть элемент объема на расстоянии $x$ от нашего глаза рассеивает долю $sdx$. Эта величина ослабляется в $e^{-sx}$ раз прежде, чем достигнет глаза. Свет, поступающий от бесконечно толстого слоя, будет состоять, таким образом, из суммы величин, приходящих от всех элементов $dx$, т. е. $\int_0^\infty se^{-sx}\,dx$, что равно 1. Это не зависит от $s$, т. е. от цвета. Небо близ горизонта должно быть поэтому таким же ярким и иметь тот же цвет, что и белый экран, освещенный Солнцем.

Недавно было неожиданно открыто, что на цвет неба влияет также присутствие озона ($O_3$), этой необычной формы кислорода, существующей на большой высоте в атмосфере. Озон имеет синий цвет, подобно куску синего стекла — из-за истинного поглощения, а не из-за рассеяния. Этот фактор вступает в игру, когда Солнце спускается к горизонту. Если бы окраска объяснялась рассеянием, небо в зените должно было бы стать серым и даже желтоватым (согласно теории); то, что это не происходит и небо в зените остается голубым, объясняется поглощением света в озоне *).

Вполне возможно также, что слои, близкие к Земле, содержат больше частиц пыли, которые увеличивают рассеяние и делают свет «белее», если даже слой воздуха нельзя считать бесконечно толстым.

Наиболее темная часть неба всегда и наиболее синяя, и имеет более насыщенный цвет. Это означает, что не существует облаков с частицами меньше 0,0001 *мм*, поскольку они должны были бы вызывать местный рост интенсивности света и в то же время не изменяли бы синевы.

Рескин отмечает, что синее небо есть наилучший пример постепенного перехода цветов **). Он призывал изучать небо после захода Солнца, отраженное в оконном стекле или в естественной рамке из деревьев и домов. Попытайтесь вообразить, что вы смотрите на картину, и вы будете удивлены уравновешенностью и нежностью переходов.

Пользуйтесь садовым шаром для того, чтобы лучше определить градации яркости и голубизны.

Посмотрите на голубое небо через кусок плоского красного стекла, достаточно большой, чтобы смотреть обоими глазами. Зенит покажется вам угрожающе темным по сравнению со светлым горизонтом. Это происходит потому, что голубой свет почти не пропускается стеклом, в то время как беловатый свет горизонта проходит через стекло достаточно хорошо. При этом можно понять, почему структура распадающихся перистых облаков кажется нам необыкновенно изящной, если наблюдать их сквозь красное стекло.

## 196. Изменчивость цвета синего неба ***)

Цвет синего неба меняется ежедневно в зависимости от количества пыли и водяных капель в воздухе: для таких сравнений необходим цианометр. Наиболее глубокая синева видна при временных прояснениях между двумя ливнями, когда устанавливается высокое дав-

*) E. O. Hulburt, J. Optic. Soc. Amer. **43**, 113, 1953.
**) Elements of Drawing, XV, 35.
***) Spangenberg, Ann. Hydr. **71**, 93, 1943.

ление. С другой стороны, небо становится белесым с приближением депрессии (области низкого давления) даже прежде, чем появляются перистые облака, или летом при запыленном воздухе.

Сравните цвет неба северных широт с синевой неба юга.

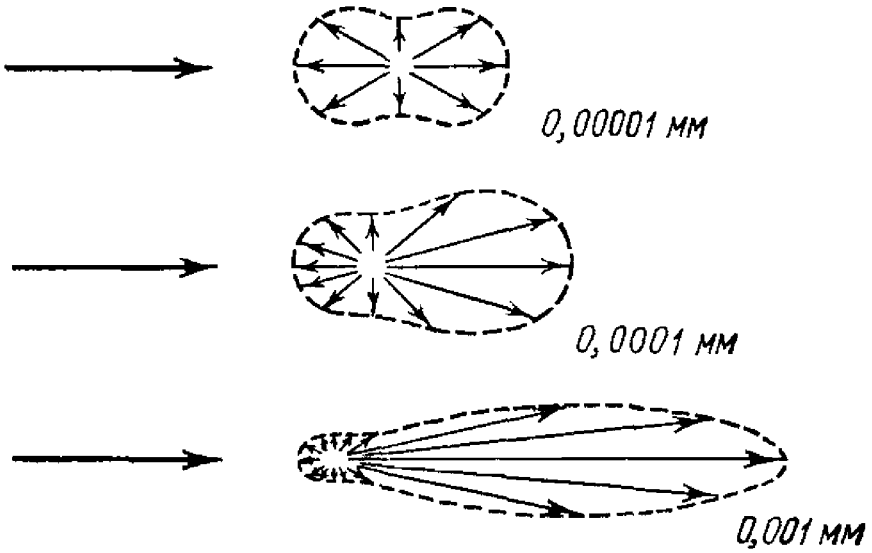



Рис. 152. Как меняется рассеяние света в разных направлениях в зависимости от величины рассеивающей частицы.

Сравните синий цвет неба в различное время дня. Небо синее всего во время восхода или захода Солнца; это легко понять — в это время точка близ зенита удалена от Солнца и от горизонта на 90° (ср. § 189).

*Малые частицы рассеивают преимущественно фиолетовый и синий цвет и при этом почти одинаково во всех направлениях.*

*Большие частицы рассеивают все цвета одинаково сильно (белый свет) и преимущественно под малыми углами* (рис. 152).

## 197. Когда цвет далекого неба оранжевый и когда он зеленый *)?

Мы видели, что когда небо безоблачно, горизонт имеет тот же цвет, что и лист белой бумаги, освещенный непосредственно Солнцем. Ясно поэтому, что при заходе Солнца, когда все залито теплым оранжевым светом, того же цвета должен быть и горизонт.

Однако временами далекий горизонт становится оранжевым задолго до захода Солнца. Тяжелая темная гряда облаков покрывает весь пейзаж, и только далеко у горизонта остается «окно», в которое светит Солнце (рис. 153). В такие моменты этот маленький участок неба имеет удивительно теплый оранжевый цвет, выделяющий темные силуэты далеких строений и производящий еще более глубокое впечатление из-за затемненности остальной части пейзажа.

*) M. Minnaert, Hemel en Dampkring **29**, 1, 1931.

Замечательно, что Рескин отметил это явление во всех подробностях, хотя в то время не было теоретических оснований предполагать его существование *)

Объяснение таково рассмотрим объем воздуха на расстоянии $x$, освещенный солнечным светом, прошедшим в атмосфере путь $X$

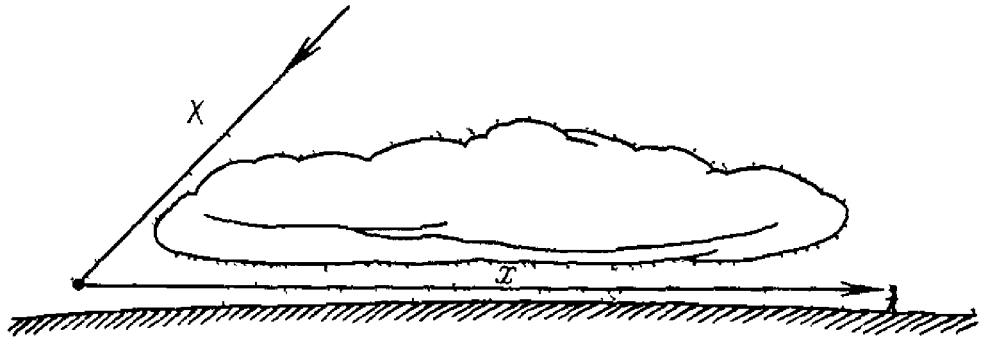



Рис 153 Когда над большей частью пейзажа располагается тяжелая гряда облаков, горизонт иногда оказывается окрашенным в теплый оранжевый цвет

В предположении, что на километр пути рассеивается доля света $s$, интенсивность в $x$ должна быть пропорциональна $e^{-sX}$ Молекулы воздуха, находящиеся в $x$, рассеивают по направлению к нашему глазу долю падающего света, пропорциональную $s$, так что, если интенсивность в $x$ равна единице, то доля, достигающая нашего глаза, должна быть $se^{-sx}$ Но интенсивность в $x$ была пропорциональна $e^{-sX}$, следовательно, количество света, действительно попадающее в наш глаз, пропорционально $se^{-sx}e^{-sX}$ или $se^{-(sx+X)}$ Это выражение имеет максимум для средних значений $s$, для малых и больших значении $s$ оно стремится к нулю Таким образом, свет с большой длиной волны почти не рассеивается на своем пути в воздухе, свет с малой длиной волны значительно ослабляется, проходя большие расстояния в атмосфере Рис 154 показывает, как изменяется состав света, попадающего в наш глаз из элементарного объема воздуха, для которого $x$ $X$ равно 0, 8, 16, 24, 40, 48 *км* Максимум, т е цвет, в котором свет, приходящий к нам, имеет максимум интенсивности, сдвигается все более и более от синего к красному, соответственно удалению освещенного объема воздуха При $x+X=35$ *км* цвет становится практически зеленым, при 45 *км* он превращается в оранжевый

Это объясняет также происхождение красивого зеленого цвета неба, который мы видим временами (например, после снегопада) Из рис 154 следует, что в этом случае зеленая компонента лишь немного преобладает над другими цветами, так что зеленый цвет должен быть лишь слабо насыщенным, как это и наблюдается.

*) Modern Painters, III, 349.

В действительности зеленая и желтая компоненты всегда присутствуют в свете горизонта, но в безоблачную погоду они смешиваются с синей, возникающей на более близких частицах, и создают белый свет В облачную погоду необычные световые эффекты возникают,

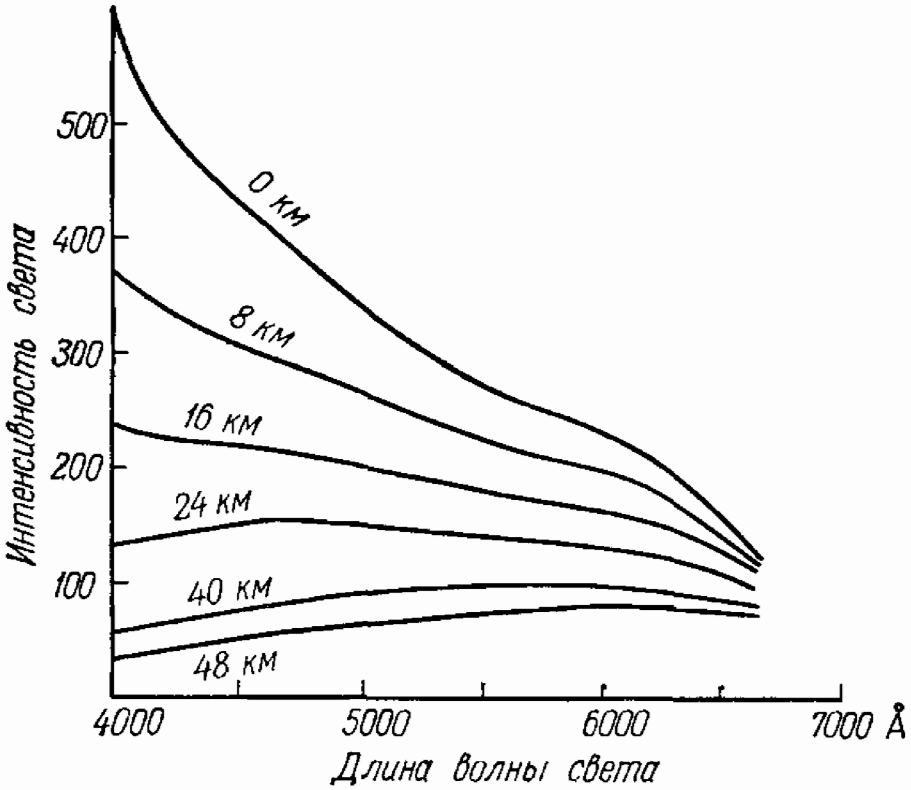



Рис 154 Состав света, падающего в глаз из небольшого объема воздуха, в зависимости от расстояния до этого объема Строя этот график, мы воспользовались ко ф фициентом рассеяния, определенным для атмосферы как целого (Строго говоря, следовало бы использовать коэффициент рассеяния для наиболее низких слоев атмосферы )

когда световой луч проходит через затененное пространство, а когда в облаках, покрывающих небо, образуются два три просвета, возможны чрезвычайно разнообразные оттенки цветов

## 198. Цвет неба во время солнечного затмения

*Частное* затмение Солнца позволяет нам видеть, как меняется цвет неба из-за тени Луны и как различаются цвета с той стороны, откуда идет тень, и с той стороны, в которую она движется

*Полное* затмение Солнца, происходящее — увы! — слишком редко, показывает гораздо большее великолепие цветов Сторона неба, откуда надвигается тень, кажется темно-пурпурной, как если бы собиралась гроза Во время полной фазы небо вдали кажется темно-оранжевым, потому что вне зоны полной фазы атмосфера освещена Солнцем, и эта освещенная часть атмосферы видна сквозь неосвещенную ее часть (ср § 197)

## 199. Поляризация света синего неба

Степень поляризации голубого неба весьма велика. Это особенно ясно, когда Солнце невысоко. Поляризацию можно наблюдать при помощи николя или, проще, воспользовавшись куском стекла с темным покрытием*). Если луч света падает на это стекло под углом 60° к нормали («угол поляризации»), отраженный свет почти полностью поляризован, и колебания в отраженном луче перпендикулярны к плоскости падения.

Посмотрим теперь, как участок неба, расположенный непосредственно над нами, отражается в стекле, которое следует держать приблизительно в 20 *см* над уровнем наших глаз так, чтобы отражение было возможно ближе к углу поляризации (рис. 155, *а*). Если вы

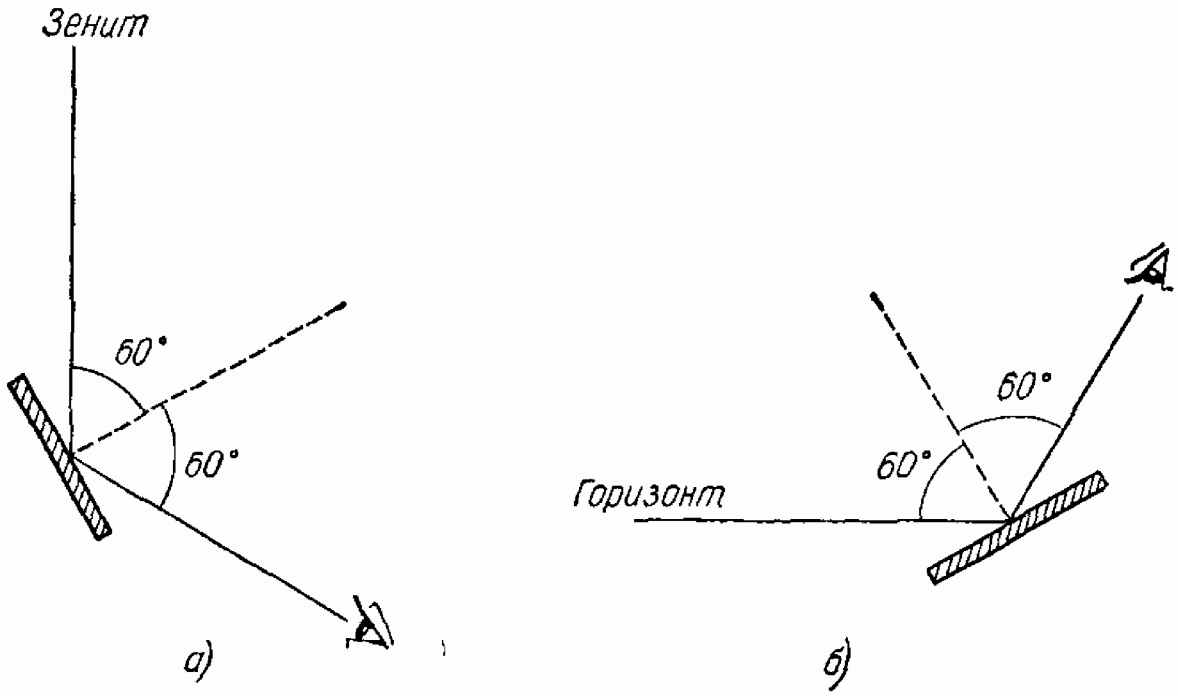



Рис. 155. Исследование поляризации света неба *а*) близ зенита; *б*) близ горизонта.

будете поворачиваться по азимуту, держа в то же время стекло так, чтобы в нем постоянно отражалась о д н а и т а ж е т о ч к а над вашей головой, вы увидите, что отраженное изображение я р к о е, когда вы стоите лицом или спиной к Солнцу, и т е м н е е, когда вы стоите под прямым углом к этому направлению. Это означает, что электрические колебания в световом луче, идущем от зенита, располагаются перпендикулярно к плоскости, проходящей через Солнце, зенит и ваш глаз. Это действительно общее правило, когда свет рассеивается мелкими частицами.

Посмотрим теперь на отражение участка неба близ горизонта, продолжая держать стекло так, чтобы углы падения и отражения были равны углу поляризации (рис. 155, *б*). Мы увидим изображение

*) Можно купить также поляризационный светофильтр.

ярким со стороны Солнца и со стороны, противоположной Солнцу, и темным в перпендикулярном направлении. То, что изображение ярче со стороны Солнца, не является неожиданным, но в трех остальных направлениях небо без отражающего стекла кажется глазу почти одинаковой яркости, так что наблюдаемое различие в отраженном свете есть всецело эффект поляризации. Небо близ горизонта в стороне, противоположной Солнцу, посылает нам лишь слабо поляризованный свет, в то время как поляризация света от двух других участков неба сильна, и колебания происходят в вертикальной плоскости, т. е. перпендикулярно к плоскости, содержащей Солнце, наблюдаемую точку и наш глаз.

Иногда интересуются, ставит ли сама природа когда-либо для нас такие опыты. Уже отражения неба в спокойной воде достаточно, чтобы отчетливо увидеть более темные области; нужно посмотреть на поверхность воды под углом несколько больше 50°, поворачиваясь ко всем четырем странам света. Когда Солнце низко, вода на севере и на юге будет казаться заметно темнее, чем на востоке и на западе.

По моему личному опыту, этот эксперимент иногда удается, но не часто: как правило, яркость неба неодинакова или поверхность воды недостаточно спокойна.

Более убедительно, что иногда небольшие облака, с трудом различимые в воздухе, можно видеть гораздо отчетливее отраженными в воде, потому что их свет, не будучи поляризованным, ослабляется в меньшей степени, чем поляризованный свет неба *). Такой же эффект, естественно, еще более силен, когда небо и облака наблюдаются сквозь николь или отраженными в куске темного стекла. Удобнее всего наблюдать за небольшими облаками на высоте 20—40° на юге или на севере, где свет неба поляризован сильнее всего, когда Солнце стоит низко на западе или на востоке. Направление колебаний почти перпендикулярно к прямой, соединяющей эту часть неба и Солнце, т. е. близко к вертикали, так что в куске стекла, лежащем на столе перед нами, мы видим свет этого участка неба значительно ослабленным и потому маленькие облака выделяются яснее.

Специально для исследования поляризации света неба предназначен полярископ Савара — небольшой прибор, простой и очень чувствительный. Считаясь, однако, с тем, что лишь немногие любители природы обладают этим прибором и что эти наблюдения образуют совершенно отдельную область метеорологической оптики, мы ограничимся указанием некоторой литературы по этому вопросу **).

*) Meteor. Zs. **6**, 1889.

**) Fr. Busch und Chr. Jensen, Tatsachen und Theorien der atmosphärischen Polarisation, Hamburg, 1911; Plassmann, Ann. d. Hydr. **40**. 478, 1912; Wetter **34**, 133, 1917.

Это чрезвычайно интересное и многостороннее занятие для тех, кто займется этим достаточно серьезно и проведет серию систематических наблюдении

Поляризацию неба легко наблюдать при помощи николя (или поляроида), вращая его вокруг оси Описанныи ниже метод очень чувствителен, но применим лишь в сумерках Выберите звезду, настолько слабую, чтобы она была едва различима, и попытаитесь оценить, не будет ли она видна лучше при одних положениях николя, чем при других *) Этот метод основан на том же принципе, что и описанный выше метод наблюдения малых облаков Свет звезды не поляризован и чем темнее фон, тем яснее видна звезда, таким образом, изменения видимости указывают на изменение яркости фона, т е на поляризацию

По той же причине днем николь увеличивает видимость далеких объектов, если его повернуть так, чтобы он «срезал» свет, рассеянныи небом **) Далекие белые колонны, маяки, чайки и т д яснее выделяются на фоне неба, однако только в ясный день, в пасмурный день свет серого неба поляризован слабее Деиствие николя сказывается сильнее в направлении на 90° от Солнца

В Америке поляроид используется для того, чтобы обнаружить лесные пожары Дым не поляризует свет, и пожар можно обнаружить на фоне неба

Исследуйте с вашим темным стеклом поляризацию отдельных точек синего неба и попытайтесь сделать общий обзор Можно ли наблюдать области необычного направления поляризации под Солнцем так же, как над точкои, противоположной Солнцу? Что произоидет, если отражение синего неба в садовом шаре рассматривать с нашим темным стеклом под углом поляризации?

## 200. Гайдингеровы щетки (пятна Гайдингера) ***)

Многие физики, работающие в лабораториях, удивляются и подозревают обман, когда им говорят, что можно невооруженным глазом, без помощи какого-либо инструмента, наблюдать поляризацию света неба Это, однако, требует некоторой практики Начать следует с полностью поляризованного света, изучая отражение неба в поверхности стекла под углом поляризации (§ 199) После того как в течение минуты или двух будет наблюдаться однородное голубое небо, начнет появляться «мраморный» эффект В направлении, куда направлен взгляд, он вскоре сменится замечательным рисун-

---

*) C R Paris **47**, 450, 1858

**) H N R u s s e l l, Science **63** 616, 1917

***) Fr B u s c h en Chr J e n s e n, Tatsachen und Theorien der atmospharischen Polarisation, Hamburg, 1911 H e l m h o l t z Physiologische Optik, 3 e изд , II, 256, T h M e n d e l s o h n, Rev Faculte des Sc Istamboul **3**, fasc **2**, 1938.

ком, известным под названием *щеток Гайдингера*, более или менее напоминающим показанный на рис 156 Это — желтоватая щетка с маленькими синими облачками по обе стороны Желтая щетка располагается в плоскости падения света, отраженного от стекла, другими словами, желтая щетка всегда перпендикулярна к направлению световых колебаний.

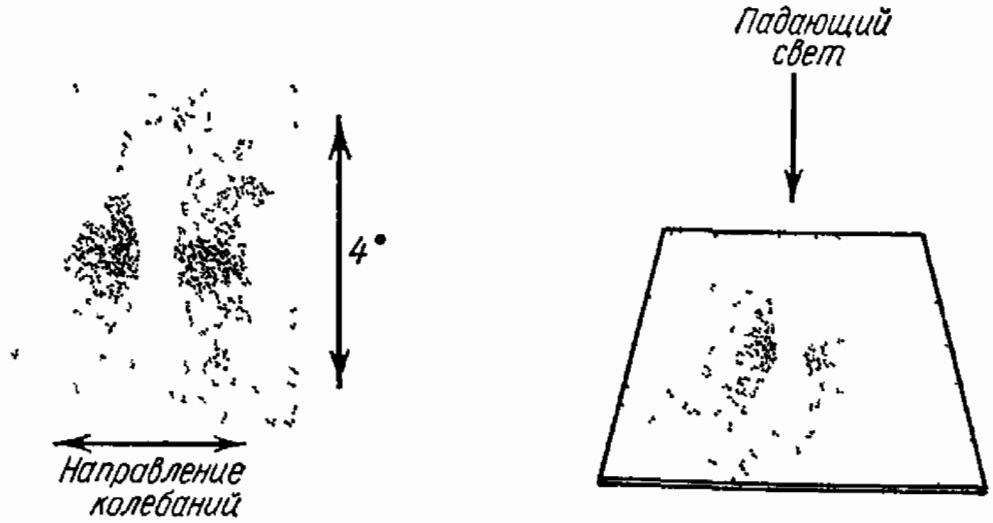



Рис 156 Фигура Гайдингера (щетка Гайдингера) Она наблюдается на фоне голубого неба и указывает на поляризацию его света (светлая «щетка» в действительности желтоватая, «облачка» по каждую ее сторону — голубые)

Рисунок исчезает через несколько секунд, но если вы фиксируете взгляд на близкой к нему точке поверхности стекла, вы увидите этот рисунок снова! *)

Рисунок различить нелегко по-видимому, задача состоит в том, чтобы научиться выделять этот слабый контраст на не вполне однородном фоне Нужно практиковаться по нескольку раз в день, каждый раз по несколько минут Через день или два щетки Гайдингера будут хорошо различаться при взгляде на безоблачное небо, хотя свет неба поляризован лишь частично Я вижу их особенно ясно в сумерки, если пристально смотрю в зенит, все небо кажется покрытым как бы сеткой, и куда бы я ни посмотрел, я всюду вижу эту характерную фигуру Очень удобно иметь возможность определять таким путем без какого-либо инструмента направление поляризации и даже оценивать ее степень Желтая «щетка», если ее продолжить как дугу большого круга, вообще говоря, направлена к Солнцу Это показывает, что колебания рассеянного света происходят перпендикулярно к плоскости, проходящей через Солнце, молекулу воздуха и глаз

*) Если в вашем распоряжении есть николь или поляроид, смотрите сквозь него на белое облако или на ровно освещенную поверхность и попытайтесь различить этот рисунок, используя тот факт, что он поворачивается при вращении николя

Щетку Гайдингера можно видеть еще более ясно в отражении неба в садовом шаре, если голова наблюдателя заслоняет изображение Солнца (ср § 12) В этом случае можно также наблюдать небольшую область близ Солнца, в которои желтая щетка направлена не к Солнцу, а под прямым углом к нему, граница между этой и обычной областями имеет вид тени

Щетка Гайдингера обусловлена дихроизмом желтого пятна нашей сетчатки Так как наблюдатели видят эту замечательную фигуру по-разному, не остается сомнений в различиях формы и строения желтого пятна Например, некоторые не видят синюю часть фигуры, некоторые видят непрерывной желтую часть фигуры, другие — синюю (рис 157) Два следующих утверждения противопоставляются одно другому

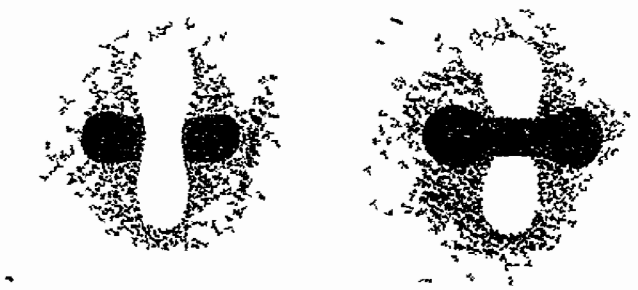



Рис 157 Мы не всегда видим фигуру Гаидингера одинаковой *а)* сплошная полоска — желтоватая, *б)* сплошной кажется голубая полоска

1 Согласно первому впечатлению желтая полоска непрерывна, когда глаз устает от длительного напряжения, изображение изменяется, и непрерывной становится синяя полоска *)

2 Непрерывная полоска всегда перпендикулярна линии, соединяющей глаза Если вы смотрите на фиксированную точку неба, поворачивая голову на 90°, вы увидите непрерывной полоску сначала одного, а затем другого цвета **) Преходящий характер фигуры затрудняет формирование мнения о ней

Щетку Гайдингера можно увидеть гораздо яснее, если смотреть сквозь зеленое или синее стекло Она исчезает, если пользоваться красным или желтым стеклом ***) Примечательно, что близ горизонта она кажется вдвое больше, чем высоко в небе, т е видимые размеры фигуры Гайдингера меняются так же, как размеры Солнца и Луны (§ 126)

> Иногда оставшись один в гостиной, когда Любочка играет какую-нибудь старинную музыку, я невольно оставляю книгу и, вглядываясь в растворенную дверь балкона, в кудрявые висячие ветви высоких берез, на которых уже заходит вечерняя тень и в чистое небо на котором как смотришь пристально, вдруг показывается как будто пыльное желтоватое пятнышко и снова исчезает
>
> (Л Н. Толстой, Юность)

*) Haidinger, Ann d Phys **67** 435, 1846

**) Brewster Ann d Phys **107**, 346, 1859 По видимому, это согласуется с работой A Hoffmann, Wetter **34**, 133, 1917.

***) Stokes, Papers, V.

## 201. Рассеяние света туманом

Мы говорим о *тумане*, когда предметы нельзя различать дальше 1 *км* Если же они остаются различимыми на расстоянии до 2 *км*, принято говорить о дымке

Тонкий туман раннего утра с Солнцем, светящим сквозь него, бывает совершенно очаровательным и придает поэтический оттенок даже самому прозаическому пейзажу Более плотный туман мешает видеть на большом расстоянии, а близкие деревья и дома окутывает так, что мы считаем их расположенными очень далеко В то же время большие видимые размеры домов и деревьев изумляют нас и в свою очередь вселяют в нас уверенность в их необычайной высоте. Благодаря сочетанию этих, часто совершенно подсознательных впечатлений, такой туман придает дворцовое величие большим строениям и возносит верхушки башен и облака *)

Цвета предметов, видимых сквозь туман, обычно остаются неизменными, Солнце — хотя и менее ярким, но по-прежнему белым, а далекие утренние фонари не отличаются по цвету от близких Бывают, однако, и другие случаи например, Солнце на значительной высоте над горизонтом иногда кажется сквозь туман красным Это наблюдалось, например, в Утрехте 14 мая 1940 г , когда огромное облако поднялось над подвергшимся в то время бомбардировке Роттердамом и постепенно достигло Утрехта, Солнце и Луна приобрели густо-оранжевый оттенок Все зависит, конечно, от величины капель, источник света кажется красноватым, когда капли настолько малы, что приближаются по размерам к длине волны света и поэтому рассеивают главным образом синие и фиолетовые лучи, меньше влияя на желтые и красные (§ 189) Поскольку туман освещается и рассеянным, и проходящим светом, он в таких случаях сам белый, определенно белее, чем бледно-оранжевое Солнце Плотный туман не синеват — рассеянный свет составляет до 99% падающего, поэтому он всегда белый, хотя каждый элемент объема может рассеивать преимущественно синие лучи

Заметьте, что в тумане очертания предметов остаются такими же резкими, какими они были Все окутывается световой пеленой, контрасты уменьшаются, но при этом не возникает размытых переходов между светлыми и темными частями ландшафта

Сравнительно большие капли, подобные тем, которые образуют туман, рассеивают большую часть света вперед, под малыми углами к первоначальному направлению падения. Это объясняет, почему тонкий туман можно видеть гораздо более ясно в направлениях, близких к Солнцу Великолепные фотографии солнечного тумана в лесу можно получить, снимая против света, камера направляется несколько в сторону от Солнца

*) V Cornish, Geogr Journ **67**, 506, 1926.

Наиболее удивительна «объемность» теней в плотном тумане (рис 158). Приближаясь к дереву, ствол которого освещен Солнцем, вы увидите большое количество света в направлениях *AO* и *BO*, поскольку в этих направлениях многочисленные капли тумана, рассеивая свет, делают воздух «самосветящимся». Вдоль *CO* вы увидите гораздо меньше света, так как здесь воздух не освещен Если ваш глаз передвинется несколько в сторону, например в *O'*, то светлая и темная области тумана наложутся друг на друга и тень станет неразличимой. Более того, в направлениях *AO'* и *BO'* вообще будет затруднительно увидеть свет, потому что под столь значительным

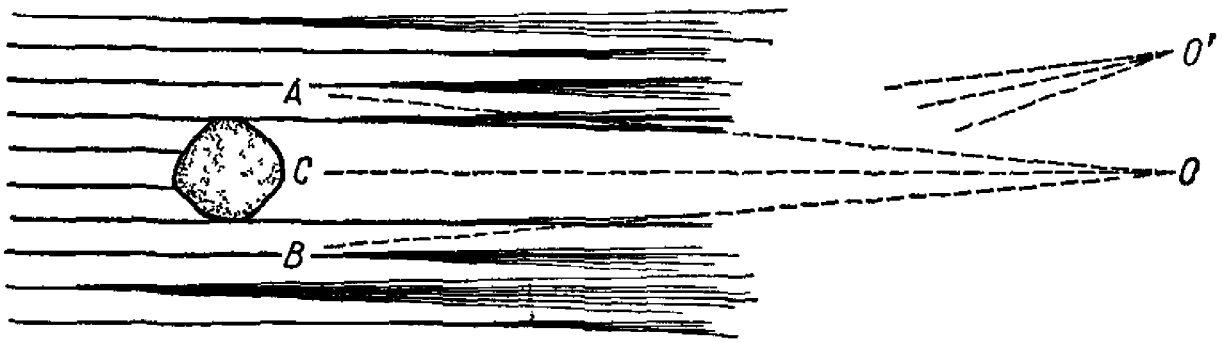



Рис. 158. Как в тумане образуется тень за каким-либо предметом.

углом рассеяние становится пренебрежимо малым. Таким образом, тень «висит» в пространстве за каждой веткой и каждым столбом, но вы не видите эту тень, пока не оказываетесь в ней. Еще удивительнее эта картина ночью, когда каждый уличный фонарь и фары каждого автомобиля заставляют туман светиться, а любой предмет — отбрасывать тени, которые, однако, видны только сзади. Прогулка в тумане — это, с точки зрения оптики, настоящее удовольствие!

Поразительна вертикальная тень, которую мы иногда замечаем в тумане над башней, глядя по направлению к Солнцу

Если смотреть поперек тени, то иногда можно видеть теневую полосу, например, когда лучи Солнца косо падают на крыши домов и вы смотрите более или менее вдоль линии тени, с трудом различимой в воздухе.

Рассеяние в обратном направлении в тумане наблюдать гораздо труднее. Туман должен быть образован очень мелкими каплями и в то же время быть плотным; кроме того, должен быть ослепительно яркий источник света позади нас и темный фон перед нами Иногда, стоя перед открытым окном в туманную ночь, мы можем видеть нашу тень, проектирующейся на туман, если позади нас сильный свет *). Заметьте, что тень отбрасывается на туман, а не на землю, поскольку она видна даже если лампа расположена несколько ниже вашей головы Подождите, пока ваши глаза приспособятся

*) F. Richarz, Meteor. Zs. **25**, 19, 1908.

к темноте снаружи, защитив их руками от света сбоку (рис 159). Тень ваших рук в тумане сильно вытягивается, а тень вашего тела становится громадных размеров и конусовидной Все полосы тени сходятся к тени вашей головы, которая служит «противоточкой» лампе Световое сияние, окружающее эту точку, становится заметнее, если вы двигаетесь вправо и влево Эта чудесная картина — не что иное, как «Брокенский призрак», который оставляет такое глубокое впечатление, когда наблюдается на высокой горной

Рис 159 Брокенский призрак.

вершине при Солнце и тумане Большие размеры этого явления обусловлены тем, что тень не лежит в одной плоскости, но простирается, вероятно, на глубину в десятки метров

Велосипедист, освещенный сзади ослепительным светом фар легкового автомобиля, иногда видит свою тень в тумане, увеличенной до гигантских размеров То же явление возникает, если голова велосипедиста освещена фарой другого велосипедиста

Световое сияние и различимые на нем тени возникают вследствие того, что небольшая часть света рассеивается на каплях тумана в обратном направлении, все эти лучи, которые кажутся нашему глазу сходящимися, в действительности *параллельны* друг другу, или почти параллельны (ср. § 212, 240).

## 202. Рассеяние света в облаках

Примечательно, что некоторые виды облаков сильно размывают очертания Солнца: иногда вместо Солнца видно только диффузное световое пятно Примером могут служить высокослоистые облака, сквозь которые Солнце светит как сквозь матовое стекло.

Сравните с этим вид Солнца при тумане и сквозь другие виды облаков, которые будут смягчать яркость Солнца, оставляя при этом края солнечного диска резко очерченными.

Нужно, однако, иметь в виду, что при этом может играть роль также неравномерное преломление лучей в различных слоях воздуха, которые местами бывают теплее или холоднее, более влажными или более сухими.

### 203. Видимость водяных капель

Во время ливня стоит понаблюдать, в каком направлении легче всего увидеть падающие капли. Капли не видны ни на фоне яркого неба, ни на фоне земли, но они хорошо наблюдаются на фоне домов и деревьев. Очевидно, их можно видеть только в том случае, если они отклоняют световые лучи и свет появляется там, где прежде было темно. По-видимому, световые лучи отклоняются в основном на сравнительно небольшие углы — от 0 до 45°. Чем сильнее это отклонение изменяет яркость фона, тем отчетливее видны капли.

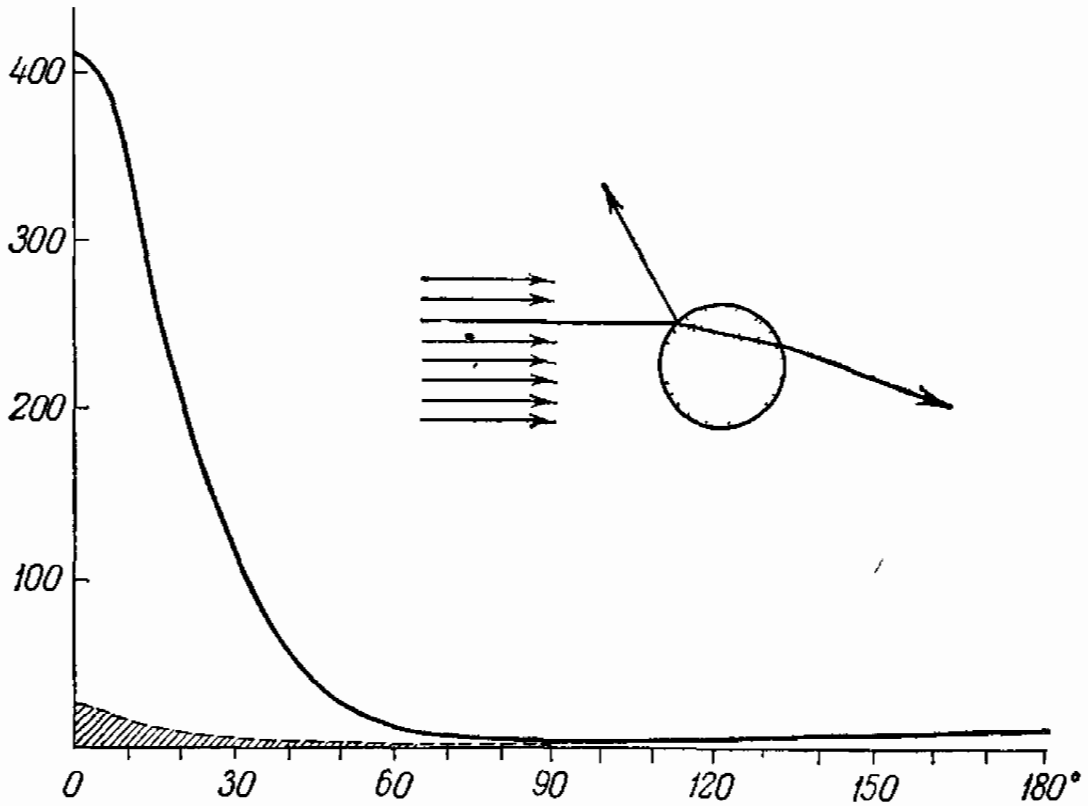



Рис. 160 Солнечный свет, играющий в дождевых каплях, преломляется и отражается в любых направлениях. График показывает распределение света в зависимости от угла отклонения. Заштрихованная область показывает долю отраженного света.

Если во время дождя светит Солнце, капли близ него искрятся ярче, чем обычно: это происходит из-за громадного различия в яркостях Солнца и неба, так что каждая преломляющая капля бросается в глаза. Эти сверкающие полосы падающего дождя создают в пейзаже особенное настроение, связывая воедино две такие противоположности, как радостный солнечный свет и мрачное небо.

На темном фоне вы можете видеть капли светящимися подобно жемчужинам: на светлом небе они редко кажутся темными. Это —

следствие общего принципа, что глаз чувствителен к *отношению* световых интенсивностей, а не к их *разности* (§ 74).

Если свет с интенсивностью 100 падает на каплю, и интенсивность, рассеиваемая каплей, составляет 10, капля будет прекрасно видна на темном фоне с интенсивностью 5, поскольку отношение интенсивностей составляет 2 : 1. С другой стороны, уменьшение интенсивности проходящего света от 100 до 90 означает, что отношение интенсивностей для капли, видимой на фоне неба, составляет лишь 10 : 9, что с трудом различимо. Однако, если капли близки к нам,— например, большие капли с наших зонтов,— они во время падения кажутся темными, и при сильном ливне мы можем видеть темные параллельные полосы на светлом фоне прорывов в облаках. Подобное же явление можно наблюдать в фонтанах и в струе воды из брандспойта.

Применяя обычные законы оптики, легко рассчитать, какую долю вносят в окончательное распределение света лучи, отраженные от поверхности капли, и какую — лучи, прошедшие сквозь каплю после преломления (рис. 160). Оказывается, последние играют гораздо бо́льшую роль и свет действительно отклоняется на сравнительно небольшие углы, как и показали прямые наблюдения *).

## 204. Рассеяние света на траве, покрытой росой

Я еду в поезде и смотрю на большой луг, освещенный ранним утренним Солнцем. Весь он равномерно покрыт сильной росой. Быстрое движение поезда помогает воспринимать луг как одно целое. Я замечаю, что луг больше рассеивает свет вдалеке и цвет травы почти нельзя различить; там луг кажется несколько белее, чем в той части, которая расположена ближе ко мне.

В тех частях луга, которые расположены совсем близко ко мне, я вижу только отдельные световые полоски, но чем дальше простирается от меня луг, тем становится их больше и они светятся ярче.

Объяснение очень простое: вдалеке угол между падающим и отраженным лучом наибольший, а угол отклонения наименьший. Из § 203 нам становится понятным, что свет должен быть вдалеке и наиболее ярким. Нам понятно также, что наблюдение особенно эффективно, когда Солнце находится низко у горизонта.

## 205. Рассеяние света в запотевшем окне

Через запотевшее стекло вагона уличные фонари кажутся нам световыми пятнами то бо́льших, то меньших размеров, в зависимости от того, насколько сильно запотело окно. Легко высчитать радиус $r$

*) Chr. Wiener, Nov. Act. Lecp. **73**, 106, 1900.

кругообразного пятна, а также определить расстояние $A$ до нашего глаза (рис. 161). Вы найдете, что рассеяние практически исчезает при угле $\alpha = r/A$ от 0,05 до 0,10 радиана, т. е. при 3—6°.

На самом деле рассеивающие свет капли не шарообразны, а являются сегментами шарика с маленькой выпуклостью. Те лучи,

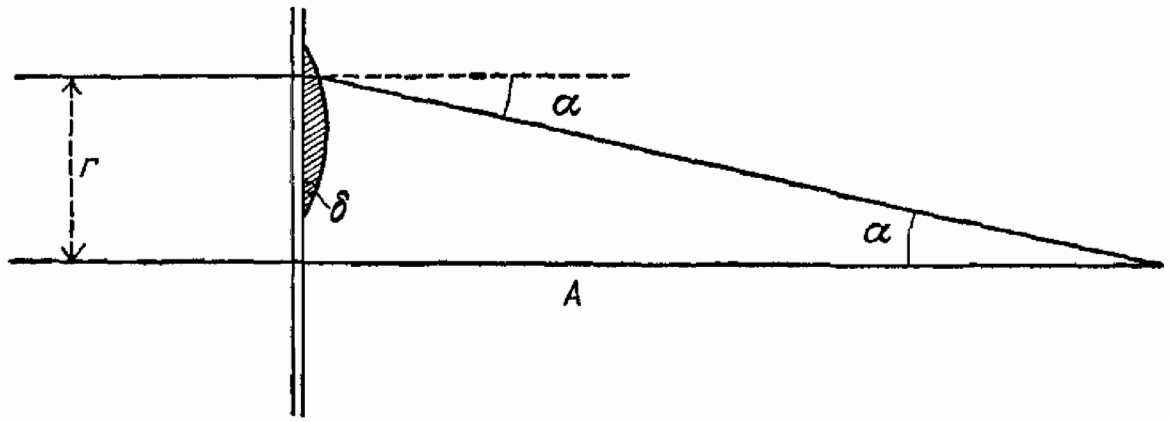



Рис. 161. Преломление света в капле воды на стекле.

которые касаются края этих капель, испытывают наибольшие отклонения. Они преломляются как бы призмой под углом, равным примерно $\alpha = (n-1)\delta$, где $\delta$ — угол преломления, а $n$ — показатель преломления, равный 1,33. Так как $\alpha$ равно 3—6°, то $\delta$ должно составлять от 10 до 20°.

## 206. Видимость частиц, парящих в воздухе *)

Приведенное выше объяснение видимости капель в большей или меньшей степени приложимо к любой парящей в воздухе частице. Облака пыли или дыма лучше видны по направлению к Солнцу. Смотря по направлению к Солнцу в солнечную погоду, мы часто видим легкую дымку вдоль горизонта, поднимающуюся над ним приблизительно на 3°; на расстоянии, не превышающем километра, цвета пейзажа перестают быть отчетливыми; шпили далеких церквей не видны. Луна при восходе вечером кажется ярко-красной, а потом поразительно быстро становится желто-белого цвета. Если смотреть в сторону, противоположную Солнцу, та же дымка вдоль горизонта кажется более темной. Различие между светлой полосой дымки близ Солнца и темной с противоположной стороны видно особенно ясно, если вы при подъеме на гору или на воздушном шаре достигаете верхней границы дымки. Переход происходит приблизительно в 80° от Солнца, где яркость дымки практически равна яркости неба **).

Стоя во время легкого тумана в тени дымовой трубы, можно видеть Солнце окруженным ореолом, который не был заметен в ослеп-

*) G. M. Byran, Month. Weather Rev. **64**, 259, 1936.
**) Meteor. Zs. **31**, 257, 1914; Löhle, Zs. f. angew. Meteor. **60**, 269, 1943.

ляющем свете Солнца. Временами этот ореол имеет красный край. Подобный, хотя и более слабый световой эффект, обусловленный пылью и мельчайшими капельками воды, можно видеть и в отсутствие тумана (§ 217).

Рои насекомых напоминают танцующие искры, когда они располагаются от наблюдателя по ту же сторону, что и Солнце; в то же время с противоположной стороны они едва различимы. Усики колосьев волнующейся ржи против заходящего Солнца светятся красивым пурпурно-золотым светом. Сухие листья, камни, прутья и ветви — все светится, если смотреть в сторону Солнца, и с трудом или совсем неразличимы с противоположной стороны.

Эти наблюдения подтверждают, что свет отклоняется у краев экрана лишь на малые углы. Это верно и для отражения, преломления или дифракции на маленьких сферах, если только они не слишком малы. Объекты неправильной формы вызывают почти те же эффекты, что и экраны и сферы, близкие к ним по величине.

## 207. Свет прожектора *)

Луч прожектора позволяет провести ночью ряд различных интересных наблюдений. Прежде всего, мы должны вспомнить, что луч вообще не был бы видимым, если бы не частицы пыли и капли воды в воздухе, которые он освещает. Таким образом, яркость луча есть критерий чистоты воздуха.

Кажется удивительным, чтобы луч обрывался так внезапно, как это наблюдается даже, когда небо совершенно ясное и отсутствуют облака, которые могли бы действовать как «экран». Объяснение состоит в том, что наблюдатель в $O$ видит свет в направлениях $AO$,

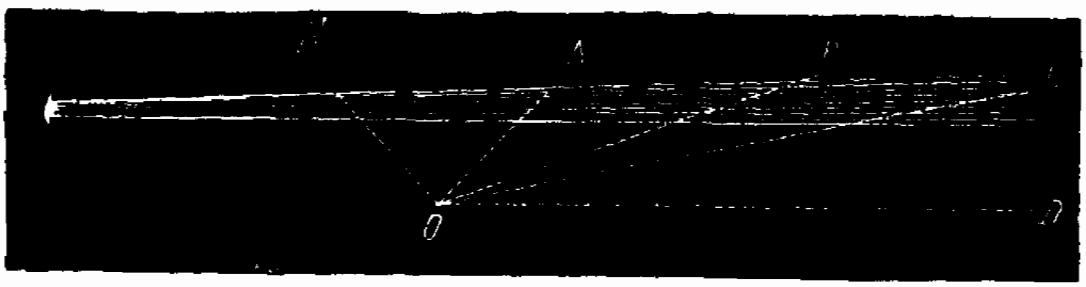



Рис. 162. Почему луч прожектора в каком-то направлении кажется внезапно обрывающимся?

$BO$, $CO$ и т. д. от всех точек вдоль луча. Но как бы ни был длинен луч, наблюдатель никогда не сможет увидеть точку на нем в направлении, лежащем за $OD$, которое параллельно $LC$. Это направление, точно фиксирующее направление луча в пространстве и представ-

*) M. Minnaert, Hemel en Dampkring **29**, 89, 1931.

ляет «конец» луча для наблюдателя. Тот факт, что наблюдатель получает значительное количество света от отдаленной части луча, следует приписать наклону, с которым на таких расстояниях взгляд пересекает луч, т. е., иными словами, толщине слоя рассеивающих частиц вдоль луча зрения; с другой стороны, в направлении $OA$ наблюдатель видит воздух, освещенный лишь на небольшом расстоянии.

Встаньте близ луча и сравните интенсивность света в направлениях 45 и 135°. Вы найдете, что рассеяние вперед — вдоль $A'O$ — гораздо сильнее, чем рассеяние назад — вдоль $AO$,— хотя количество рассеивающей материи на луче зрения в обоих случаях одинаково и мы можем пренебречь различием диаметров луча в $A$ и в $A'$. Очевидно, объяснение следует искать в несимметричности рассеяния на частицах пыли: поскольку они сравнительно велики, рассеяние должно происходить большей частью в направлении вперед (§ 189). Более удобный способ для такого наблюдения состоит в том, чтобы, став у маяка, сравнить интенсивность луча, когда он светит приблизительно в вашем направлении и когда он светит приблизительно от вас.

Некоторые опыты такого рода можно провести с лучом хорошего электрического фонарика, если ночь достаточно темна. Можно даже показать друзьям особую звезду — так четко обрисовывается «конец» луча *).

## 208. Видимость **)

Видимость измеряют на открытой местности, на которой можно выбрать ряд хорошо различимых отметок на различных расстояниях от наблюдателя. Удобными «метками» могут служить трубы фабрик и шпили церквей в далеких деревнях, расстояние до которых можно определить по хорошей карте. Каждый день наблюдатель определяет наиболее далекую точку, которая еще видна. Расстояние до этой точки и называется «видимостью». Если число точек, находящихся в его распоряжении, недостаточно, он может оценивать видимость по общему впечатлению по шкале от 0 до 10. Ясно, что видимость обусловливается сложным взаимодействием нескольких факторов и, в частности, каплями воды и частицами пыли в воздухе, рассеяние света на которых приводит к освещению более темных участков. Предположим, что некоторый объект отражает количество света $A$, воздух перед ним — $B$, а воздух позади него — $C$. Предположим, кроме того, что вследствие поглощения в воздухе

*) Davis, Science **76**, 274, 1933.

**) W. E. Knowles Middleton, Visibility in Meteorology, Toronto, 1941; Sebastian, Beitr. z. Geophys. **45**, 35, 1935; Fr. Löhle, Sichtbeobachtungen, Berlin, 1941. Все перечисленные издания имеют многочисленные литературные ссылки.

в наш глаз попадают вместо $A$, $B$ и $C$ количества $a$, $b$, $c$. Видимость далекого объекта определяется тогда отношением $\frac{a+b}{b+c}$; от этого же отношения зависит, согласно данному выше определению, и общая видимость. Это объясняет, почему видимость определяется не одними атмосферными условиями, но в какой-то степени зависит также и от положения Солнца. Чтобы свести влияние Солнца к минимуму, условились выбирать в качестве отметок темные предметы, которые проектируются на небо на высоте не меньше 0°,5 и не больше 5° и имеют угловые размеры от 0,3 до 1°,0.

Глаз наблюдателя должен быть как можно лучше защищен от постороннего света. Для этого нужно или прикрыть глаза ладонью сверху или использовать, например, какой-нибудь футляр, который должен иметь черную подкладку с внутренней стороны. Интересно, что при выполнении этих условий видимость почти не зависит от положения Солнца и от того, какой предмет выбран в качестве отметки. Даже цвет не имеет большого значения, так как далеко расположенные предметы всегда становятся серыми, прежде чем они исчезнут за пеленой, рассеивающей свет.

Видимость тех же объектов ночью гораздо хуже, чем днем. При свете полной Луны она составляет, примерно, $^1/_5$ видимости при дневном свете.

Ночью можно использовать фонари, расстояние до которых известно, или определить наименьшую высоту (в градусах), на которой становится видимой звезда первой величины. Эти определения, естественно, не будут в точности согласовываться с определениями, проведенными днем, так как измеряются, вообще говоря, разные величины.

Такие наблюдения проводились, и их результаты статистически обрабатывались многочисленными наблюдателями. Главным фактором, определяющим видимость, несомненно, служит количество пыли, поднятой ветром: вокруг частиц пыли конденсируется влага и образующиеся таким образом капли рассеивают свет. Отсюда ясно, что большое влияние оказывают и количество пыли, и влажность воздуха. Лучше всего видимость при солнечной погоде, когда мы находимся в «клиновидном» (так он выглядит на картах погоды между двумя депрессиями) максимуме атмосферного давления, который приносит нам свежий «полярный воздух», содержащий очень мало пыли. Такая погода обычно держится недолго. С другой стороны, видимость становится плохой, когда области высокого давления долго остаются на одном и том же месте, поскольку пыль постепенно опускается в нижние слои воздуха.

Тем, кто живет на берегу моря, интересно сравнить видимость, когда ветер дует с моря и когда он дует с берега. Это, однако, следует делать при одной и той же влажности — при одинаковых пока-

заниях психрометра, т. е. когда в обоих случаях отсчеты термометров с сухими и влажными шариками приблизительно одинаковы.

В маленьком шотландском городке видимость оказалась в шестьдевять раз лучше, когда ветер дул с гор, чем при ветре, проходившем над плотно населенными районами. Влияние влаги ясно из того, что видимость была в четыре раза лучше, когда психрометрическая разность была 8°, чем когда она была 2°. Можно представить себе всю картину очень отчетливо, начертив на карте прямые в направлении, откуда приходит ветер, и сделав их длину пропорциональной расстоянию видимости. Это следует сделать для различных значений влажности. Таким путем получится ряд кривых, показывающих среднюю прозрачность воздуха в зависимости от разных причин.

Видимость резко улучшается, когда вспыхивает забастовка!

Статистика показывает, кроме того, что видимость улучшается при сильном ветре и больше в летние месяцы (с марта по октябрь), чем в зимние. Вообще видимость после полудня лучше, чем утром, потому что в течение дня восходящие потоки уносят пыль из нижних слоев воздуха в верхние. После продолжительных периодов дождя и снега пыль почти вся оседает, и видимость часто бывает превосходна.

Проведите наблюдение за видимостью через красное стекло, когда даль закрыта голубой дымкой. Заметите ли вы при этом детали, которые не различались в белом свете (§ 195)?

Замечательно, насколько дальше можно видеть в потоках дождя, чем в облаках, из которых он выпадает. Причина этого ясна из следующего (рассуждение, конечно, очень грубо):

Пусть $V$ — объем воды в единице объема воздуха и пусть $V$ разделен на капли диаметра $d$, т. е. примерно объема $d^3$. Число капель будет $\frac{V}{d^3}$ и так как каждая капля заслоняет площадь (приблизительно) $d^2$, площадь, заслоненная всеми каплями, будет $\frac{Vd^2}{d^3}=\frac{V}{d}$. Таким образом, чем меньше капли, тем менее прозрачно их скопление. В плотном тумане $V\approx 10^{-6}$; в проливном дожде эта величина (что очень любопытно) приблизительно та же. Однако капли тумана имеют диаметр порядка 0,01 *мм*, а капли дождя — 0,5 *мм*. Рассмотрим теперь столб поперечным сечением в 1 *см*$^2$ и длиной $l$. Чтобы задержать приблизительно половину света, мы должны иметь $\frac{Vl}{d}=0{,}5$, т. е. для тумана $l=10$ *м*, а для дождя — 250 *м*. Это — правильный порядок величин. Из этого примера ясно, как сильно зависит результат от того, малы или велики водяные капли.

Изредка во время сильного ливня, когда капли, ударяясь о землю, разбрызгиваются на гораздо более мелкие капельки, и мы смотрим сквозь них близко к земле, видимость постепенно уменьшается. Это тоже подтверждает правильность нашего рассуждения.

## 209. Как Солнце «пьет воду»

*Так шли оба они навстречу вечернему Солнцу,*
*Лик скрывавшему свой за грозными тучами, редко*
*Там или сям из-за дымки бросая пылающим взором*
*Освещенье зловещее вдоль широкого поля.*

*(Г е т е, Герман и Доротея, Песнь VIII)*

Прекрасное свежее осеннее утро; яркий свет Солнца пронизывает листву деревьев. На некотором расстоянии мы видим в туманном воздухе великолепные параллельные пучки лучей. Но если подойти ближе, лучи уже не кажутся параллельными, а как будто исходящими из одной точки — Солнца.

Нам знакомо это явление и в бóльшем масштабе. Когда Солнце скрыто за тяжелыми облаками, а воздух наполнен легким туманом, мы часто видим солнечные лучи, проходящие сквозь прорывы в облаках и прочерчивающие свой путь сквозь туман благодаря рассеянию на каплях, из которых он состоит. Все эти лучи в действительности п а р а л л е л ь н ы (их продолжение должно пройти через Солнце, но оно так далеко от нас, что я с полным основанием говорю «параллельны»). Перспектива создает впечатление, что они расходятся из одной точки — их «точкой схода» служит Солнце,— аналогично тому, как железнодорожные линии кажутся вдали сходящимися друг к другу (фотография XIII).

Обратите внимание, что лучи берут начало у облаков, отбрасывающих тень. Между Солнцем и облаками лучей не видно.

В зависимости от перемещения облаков эти лучи становятся сильнее или слабее, перемещаются с места на место и т. д. Иногда весь пейзаж полон ими; иногда, напротив, Солнце скрыто за одним облаком, отбрасывающим темную тень. Такие теневые лучи в горных местностях часто отбрасываются утесами или вершинами гор, когда Солнце низко *).

Световые лучи могут возникать и от Луны, но они столь малой интенсивности, что видны только при сильном рассеянии в атмосфере. Это очень редкое явление создает впечатление зловещего уныния.

Почему в Германии называют это явление: «Солнце пьет воду»? Может быть, это связано с представлением, что вода поднимается по лучам, как по каналу, к Солнцу?

---

*) V. C o r n i s h, Scenery and the Sense of Sight, Cambridge, 1935.

В Голландии говорят: «Солнце стоит на ножках». Это выражение употребляется, когда Солнце находится высоко и пучки световых лучей круто падают книзу. У англичан это явление называют «лестницей Якоба» или «лестницей ангелов».

Почему пучки лучей видны лишь на малых расстояниях от Солнца и так редки, например, на расстоянии 90° от него? (Ср. § 196, 199.)

## 210. Заря *)

Человек обычно представляет себе закат драпирующимся в пурпурно-золотые облака, светящиеся глубокими теплыми тонами. Он с детским восторгом пытается найти в облаках очертания верблюда или льва, сверкающий дворец и фантастическое море огня. Физик, однако, старается начать наблюдения заката в его простейшей форме и предпочитает совершенно безоблачное чистое небо. Он изучает великолепную последовательность цветов, быстро меняющиеся нежные оттенки, переходы от синевы дня к темной глубине ночи, которые различимы лишь после определенной практики, но повторяются снова и снова почти в том же порядке, создавая великую драму Природы — драму заходящего Солнца.

Чем же вызывается это ощущение бесконечного покоя, создаваемое подобными световыми явлениями? Сравните его с радугой, вызывающей ощущение бодрости и радости. Заря вызывает это ощущение благодаря широким дугам сливающихся цветов, простирающимся через все небо так, как если бы они были горизонтальны. Горизонтальная линия, где бы она ни проявлялась в архитектуре пейзажа, говорит о покое и мире.

Серьезное изучение зари доставляет нам сведения об условиях в наиболее высоких слоях атмосферы, высоко над областью образования облаков. Лучшие месяцы для начала такого изучения — начало осени. Характер явления меняется ото дня ко дню, цвета часто бывают искажены пылью и дымкой, а особенно дымом наших городов. Поэтому наблюдения приходится повторять снова и снова.

Чтобы хорошо видеть зарю, глаз должен быть совершенно отдохнувшим. Как бы краток ни был наш взгляд на Солнце перед его заходом, мы будем ослеплены настолько, что в течение некоторого времени не сможем удовлетворительно вести наблюдения. Собираясь наблюдать восточную часть неба, мы не должны слишком долго смотреть на очень яркое небо на западе. Каждый раз, когда наши глаза отдыхают некоторое время в помещении или глядя в книгу, мы убеждаемся, насколько богаче цветами становится заря и насколько дальше она простирается, чем кажется в первый момент. Мой

*) Обширная литература собрана у P. Gruner, H. Kleinert, Die Dämmerungserscheinungen, Hamburg, 1917.

совет: сначала проследите развитие зари в целом, а затем изучайте красоту каждой отдельной части неба.

Сравнивайте между собой различные области неба при помощи маленького зеркала, держа его в вытянутой руке и проектируя таким образом на рассматриваемую часть неба участок, расположенный в другом направлении.

Возможно, вы испытаете трудности в наблюдении формы цветовых явлений, так плавно переходящих одно в другое. Однако секрет весьма прост. Нужно мысленно провести по всему небу линии *равной яркости* или *одинакового цвета*; это — линии, постоянно указываемые в описаниях, например, когда говорят, что заря обычно развивается в форме известных дуг.

Ниже приводится описание типичного захода Солнца в ясный вечер (рис. 163). Знак минус у высоты Солнца обозначает его глубину под горизонтом.

Высота Солнца 5°; полчаса до захода. Цвет неба близ горизонта превращается в теплый желтый или желто-красный, резко отличный от обычного беловато-синего дневного. *Горизонтальные полосы* ниже Солнца различаются с трудом как длинная желтоватая цветная лента (под «полосами» мы подразумеваем лишь то, что линии одинаковых цветов идут горизонтально, не имея в виду резко очерченных границ). Над ними расположено концентрично вокруг Солнца большое, очень светлое беловатое световое пятно — яркое сияние, часто окаймленное еле видимым коричневым кольцом.

Если у восточного горизонта есть белые облака, они принимают мягкий красный оттенок, а выше на небе появляется *верхняя часть восточной зари*: красочный бордюр от 6 до 12° в высоту с оранжевыми, желтыми, зелеными и синими переходами.

Высота Солнца 0°, заход. Не думайте, что заря приходит к концу! Наиболее интересная часть только начинается. На западе вдоль горизонта располагается лента цветных полос: внизу бело-желтая, затем желтая и зеленая. Над ней великолепное яркое сияние, прозрачное и белое, окруженное коричневым кольцом, высота которого достигает 50°. На востоке *тень Земли* начинает подниматься уже в самый момент начала захода. Это очень плоский синевато-серый сегмент, постепенно перемещающийся по пурпурному слою. Как правило, тень Земли нельзя проследить выше 6° над горизонтом. Иногда кажется, что очертания земной тени видны задолго до захода Солнца, но это просто слой пыли и тумана. Над земной тенью видна восточная заря во всем ее сиянии. Выше — *яркое отражение западного света*, захватывающее большую область — диффузное свечение.

Высота Солнца от —1 до —2°; 10 минут после захода. На западе горизонтальные полосы превратились в коричневую, оранжевую, желтую (снизу вверх). Яркое сияние с его

коричневым кольцом еще достигает высоты в 40°. На востоке земная тень поднимается все выше и выше и внутри нее все принимает тусклый одинаковый оттенок, более или менее близкий к сине-зеленому (одновременный цветовой контраст! Ср. § 109). Развивается цветная

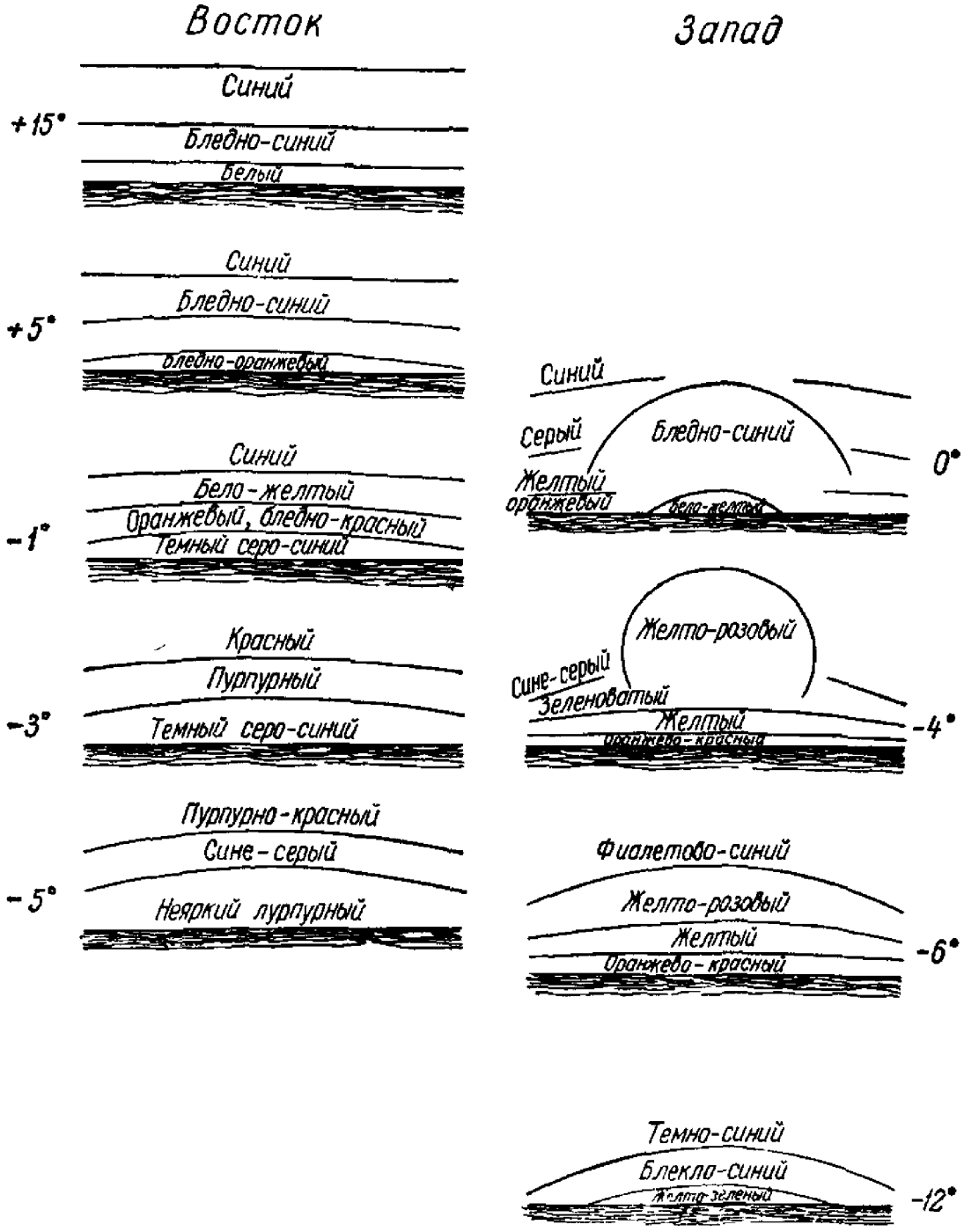



Рис. 163. Цвета неба во время заката при ясном небе. Цифры сбоку указывают высоту Солнца над горизонтом.

кайма восточной зари: снизу вверх — фиолетовая, малиновая, оранжевая, желтая, зеленая, синяя, и выше яркое отражение.

Высота Солнца от —2 до —3°; от 15 до 20 минут после захода. На западе начинается наиболее интересная часть сумеречных явлений. У вершины яркого светового сияния на высоте около 25° над горизонтом появляется розовое пятно. Оно быстро становится все больше и больше, и одновременно его види-

мый центр смещается вниз, так что оно превращается в сегмент, который становится все более плоским. Этот *пурпуровый свет* светится прекрасными мягкими, прозрачными цветами, более розовато-желтыми, чем собственно пурпуровый. Цвета горизонтальных полос тускнеют. На востоке земная тень поднялась еще выше. Верхняя часть восточной зари достигает наибольшего развития. Над ней — яркое отражение.

Высота Солнца от —3 до —4°; от 20 до 30 минут после захода. На западе яркое сияние на высоте 5—10°. Пурпуровый свет развит сильнее; наиболее интенсивно свечение на высоте 15—20° над горизонтом; верхняя граница приблизительно на высоте 40°.

Высота Солнца от —4 до —5°; от 30 до 35 минут после захода. На западе максимальное развитие пурпурового света. Западные фасады строений залиты пурпурным сиянием; земля и стволы деревьев (особенно берез) окрашены в теплые тона. В городах на узких улицах, где не виден западный горизонт, общее освещение домов отчетливо указывает на пурпуровый свет. Будьте осторожны и не смотрите слишком долго на западную часть неба! Оставайтесь возможно больше внутри помещения, выходя лишь специально для наблюдений! На востоке у земной тени иногда появляется тусклая кайма бледного мясного цвета — *нижняя часть восточной зари*. Ее появление объясняется тем, что вместо прямого света Солнца восток освещен пурпуровым светом заката. Подобная кайма редко видна в нашем климате *). Становятся видимыми звезды первой величины.

Высота Солнца от —5 до —6°; от 35 до 40 минут после захода. На западе яркое сияние исчезло. Пурпуровый свет начинает затухать, по-видимому, сливаясь с горизонтальными полосами, которые становятся ярче и окрашиваются в оранжевый цвет. На востоке граница земной тени совершенно размыта. Если видна нижняя часть восточной зари, в момент исчезновения пурпурового света можно заметить слабую вторую тень Земли.

Высота Солнца от —6, до —7°; от 45 до 60 минут после захода. На западе пурпуровый свет исчез, оставив синевато-белое сияние — *второе сияние зари*, достигающее высоты в 15—20°. Горизонтальные полосы становятся последовательно оранжевыми, желтыми и зеленоватыми. Исчезновение пурпурового света создает впечатление резкого падения освещенности. Становится трудно читать — закончились «гражданские сумерки».

Высота Солнца —9°. На западе сияние на высоте 7—10°. На востоке нижняя часть восточной зари исчезла, еще

*) La Météorologie **16**, 117, 1940.

остается очень слабое отражение. Наиболее темная точка на небе — вблизи зенита, несколько к западу от него.

Высота Солнца —12°. На западе горизонтальные полосы значительно ослабли и стали блекло-зелеными. Сине-зеленое сияние достигает 6° высоты.

Высота Солнца —15°. На западе сияние на высоте от 3 до 4°.

Высота Солнца —17°. На западе сияние исчезло. Стали видимыми звезды пятой величины. Этот момент определяется очень точно; он изменяется в зависимости от времени года и ото дня ко дню. Конец «астрономических сумерек».

Замечания о пурпуровом свете. Интенсивность пурпурового света сильно меняется ото дня ко дню. Присутствие высоко в воздухе тончайшей пелены облаков может сильно увеличить его интенсивность, и когда погода проясняется после долгих дождей, он часто бывает особенно великолепен. Обычно поздним летом или осенью он сильнее, чем весной или летом. Пурпуровый свет поляризован весьма слабо, в то время в окружающей части неба поляризация достаточно сильна. Опыт с пятном Гайдингера достаточен, чтобы отметить это различие (§ 200).

Развитие пурпурового света в сумерках не всегда совпадает с нашим описанием. Он может возникнуть одним из следующих путей *):

1. Из коричневой каймы, окружающей яркое сияние.
2. Из самого́ яркого сияния, которое превращается из желтого в розовое и пурпурное.
3. Из восточной зари, которая становится почти невидимой вблизи зенита и снова видимой, когда переходит на западную часть неба.
4. Из нежных перистых облаков, освещенных Солнцем после его захода.
5. Из пурпурного пятна, образующегося у вершины яркого сияния и постепенно распространяющегося отсюда. Это — тот тип, который описан в нашей книге, но так бывает не часто.

Никогда, если это только возможно, не пропускайте захода и восхода Солнца.

(Рескин, Современные художники)

## 211. Измерение сумеречных явлений

Измерить земную тень легко (о методах см. § 265). Отмечайте эту высоту на графике как функцию времени. Сначала земная тень растет приблизительно с той же скоростью, с какой опускается

*) Gruner, Beitr. z. Phys. d freien Atm. 8, 1, 1919.

Солнце, потом вдвое и даже втрое быстрее *). Высота над горизонтом, на которой земная тень перестает быть различимой, дает представление о чистоте воздуха. Она очень чувствительна даже к легчайшим следам замутненности: чем больше в атмосфере частиц пыли, тем раньше тень становится невидимой.

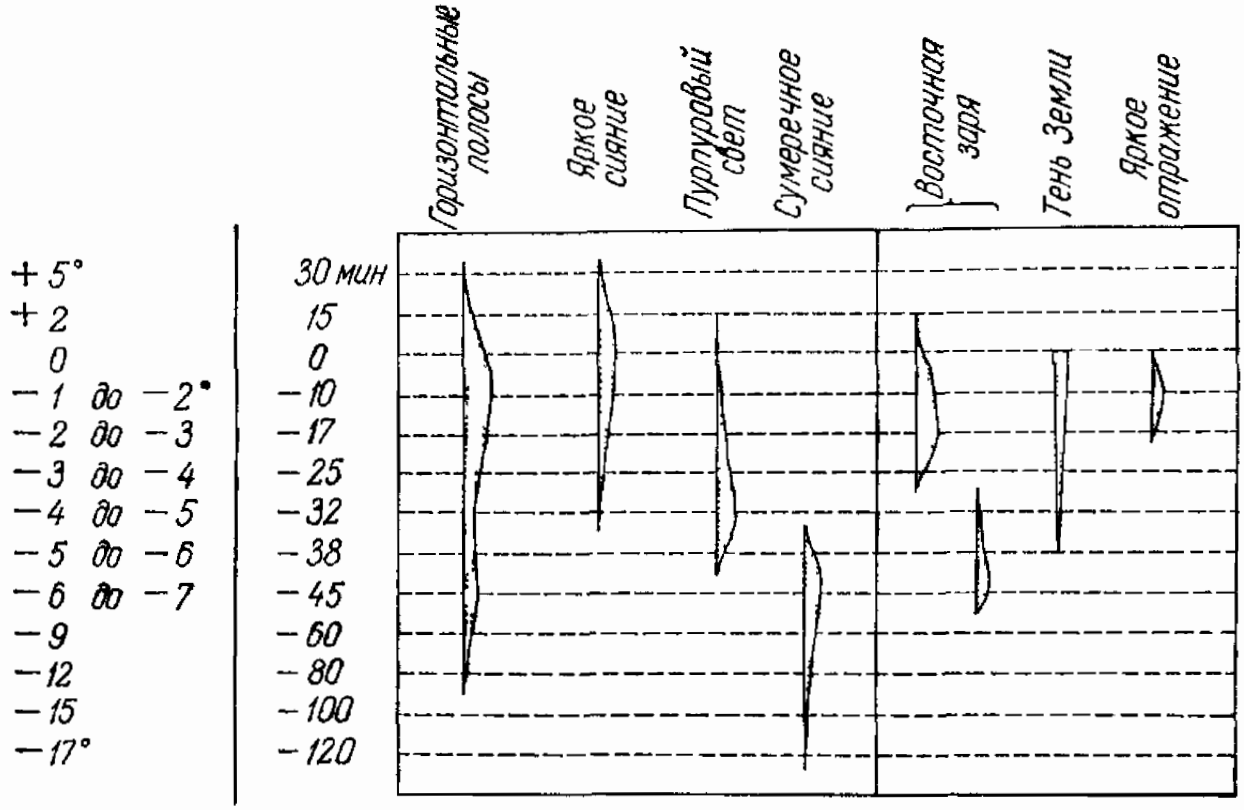



Рис. 164. Схематическая таблица развития различных сумеречных явлений.

Тень Земли хорошо фотографируется на панхроматической пленке с желтым фильтром (выдержка около 1 *сек*). На подобной фотографии можно нанести нужные отметки измерений и наблюдений **).

Измерения яркого сияния и пурпурового света сложнее. Кроме того, что время от времени желательно дать глазу отдохнуть, следует принять во внимание, что каждый темный силуэт на фоне неба вызывает эффект контраста, чего необходимо избегать. Удивительно, как изменяется та линия, которую мы считаем границей пурпурового света, если держать перед собой карандаш или дощечку. Лучший метод состоит в сравнении высоты с деревьями или башнями.

Заметим, что измерения яркости неба показали, что пурпуровый свет вызывается не увеличением яркости, но небольшим уменьшением яркости в определенной части неба по сравнению с окружающими ее

*) Теоретическое объяснение скорости подъема земной тени см. у Пернтера-Экснера. См. также В Г. Фесенков, Астр. журн. **23**, 171, 1946, **26**, 233, 1949.

**) Ch. Combier, La Météorologie **16**, 117, 1940.

частями. Таким путем возникает максимум относительной яркости, и это приводит к зрительному представлению о развивающемся здесь добавочном излучении. Подобным образом изменение цвета следует приписать небольшому падению интенсивности в определенных длинах волн.

После того как погаснет пурпуровый свет, интересно наблюдать за движением второго сияния зари. Его верхняя граница есть последняя стадия земной тени, прошедшей зенит и теперь приближающейся к западному горизонту. Она опускается сначала быстро, а затем все медленнее и медленнее.

## 212. Сумеречные лучи *)

Сумеречные явления исключительно красивы, когда облака, уходящие на западный горизонт, отбрасывают полосы тени на все небо подобно гигантскому вееру. Эти полосы выходят из воображаемой точки под горизонтом, где находится Солнце, точно так же, как солнечные лучи, «пьющие воду» (§ 209), только на этот раз небо совершенно ясное, и мы видим, как темные лучи резко вырисовываются на фоне пурпурового света; их сине-зеленый цвет создает сильный контраст, усиливающийся еще и одновременным цветовым контрастом. Сумеречные лучи показывают, каким было бы небо, если бы отсутствовало пурпурное рассеяние. Благодаря сумеречным лучам мы впервые замечаем, как далеко простирается пурпуровый свет. Их можно наблюдать не только на западе, где Солнце садится, но иногда и на восточном небе, на пурпурном фоне восточной зари, где они сходятся к точке, противоположной Солнцу. Поэтому, когда бы ни наблюдались сумеречные лучи, следует обращать внимание и на восточную часть неба.

Точные наблюдения указывают, что сумеречные лучи на востоке и на западе попарно соответствуют друг другу и представляют собой одни и те же лучи, обежавшие всю небесную сферу, у которых лучше всего видны концы. Иногда удается даже проследить эти полосы, напоминающие гигантские дуги, на всем их протяжении. Эти полосы, однако, в действительности параллельны; их дуговидная форма есть результат оптической иллюзии (§ 123).

Сумеречные лучи видны лишь в том случае, когда в воздухе находятся рассеивающие частицы. В случае солнечных лучей, «пьющих воду», они вырисовываются в легком тумане, в случае пурпурового света — в более тонких частицах пыли, вызывающих это сумеречное явление. В сумерках без пурпурового света сумеречные лучи отсутствуют; они никогда не появляются на фоне зеленоватых частей неба. С другой стороны, они могут оставаться видимыми долго после того, как пурпуровый свет сольется с горизон-

*) Smosarski, C. R. Paris **219**, 491, 1944.

тальными полосами; это в действительности доказывает, что пурпуровый свет всегда присутствует и создает существенную часть свечения западного неба.

Сумеречные лучи легче увидеть около точки их исчезновения, чем в перпендикулярном к ней направлении, поскольку в восточной и западной частях неба мы смотрим сквозь более толстый слой. Это также вытекает из закона рассеяния (ср. § 189).

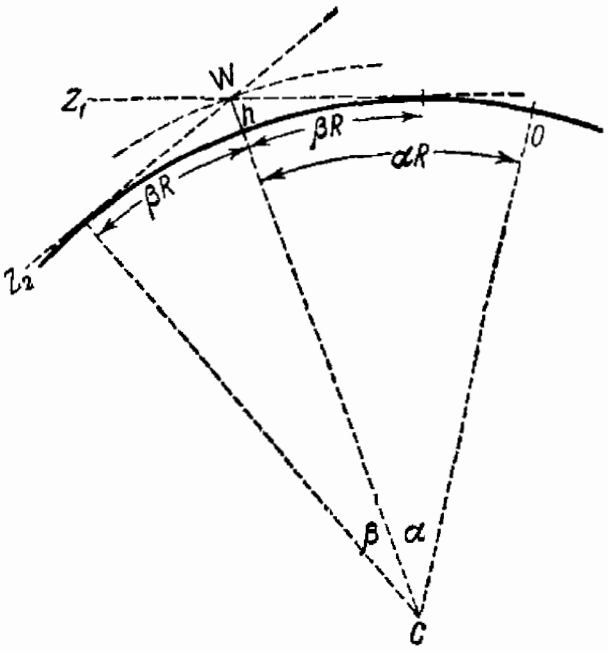



Рис. 165. Как оценить расстояние до облака, вызывающего сумеречные лучи.

Мы можем оценить, насколько далеко от нас отбрасывающее тень облако*). Если облако лежит на Земле, оно создает сумеречные лучи в момент, когда лучи Солнца пройдут по касательной к земной поверхности. Если сумеречные лучи становятся видимыми, когда Солнце погружается на угол $\alpha$ под горизонт, расстояние между облаком и нашим глазом будет $\alpha R$ ($R$—радиус Земли). Если, однако, облако занимает положение $W$ на высоте $h$, его расстояние до наблюдателя $O$, как показано на рис. 165, может иметь любое значение между $(\alpha-\beta)R$ и $(\alpha+\beta)R$, в соответствии с положением Солнца между $S_1$ и $S_2$. Здесь $\cos\beta = \frac{R}{R+h}$ или приближенно $\beta = \sqrt{\frac{2h}{R}}$.

Предположим, что сумеречный луч наблюдался спустя полчаса после захода Солнца, т. е. когда $\alpha = 4°$. Для вида облаков, образующих это явление, можно с уверенностью принять, что их высота не превышает 5 *км*, т. е. $\beta$ может самое большее составлять $\sqrt{\frac{2\cdot 5}{6400}} \approx \frac{1}{25}$ радиана (приближенно) или 2°,3. Для этого значения $\beta$ $(\alpha-\beta)$ и $(\alpha+\beta)$ будут составлять соответственно 1,7 и 6°,3. Расстояние до облака может, таким образом, иметь любое значение между 190 и 700 *км*. Этот результат объясняет, почему мы иногда видим сумеречные лучи, хотя на всем протяжении небо совершенно безоблачно.

## 213. Объяснение сумеречных явлений (рис. 166) **)

Проследим мысленно путь лучей Солнца, когда оно располагается близ горизонта. Лучи проходят большое расстояние сквозь атмосферу, и их цвет становится все более и более красным, поскольку молекулы воздуха рассеивают фиолетовый, синий и зеленый цвета. Так заходящее Солнце приобретает свой медно-красный цвет. После того, как оно скроется под горизонтом, его лучи продолжают освещать воздух над нашими головами. Нижние слои плотнее и рас-

*) Wetter **9**, 1892.

**) О теории сумерек см., например, Розенберг Г. В., Сумерки, Физматгиз, 1963.

сеивают большую часть света, верхние становятся все более разреженными и рассеивают все меньше и меньше. Если мы находимся в $O_1$ и смотрим вверх вдоль $O_1A$, слой воздуха не очень толст и, кроме того, молекулы сравнительно слабо рассеивают под углом в 90°. Поэтому близ зенита небо будет темным. С другой стороны, вдоль

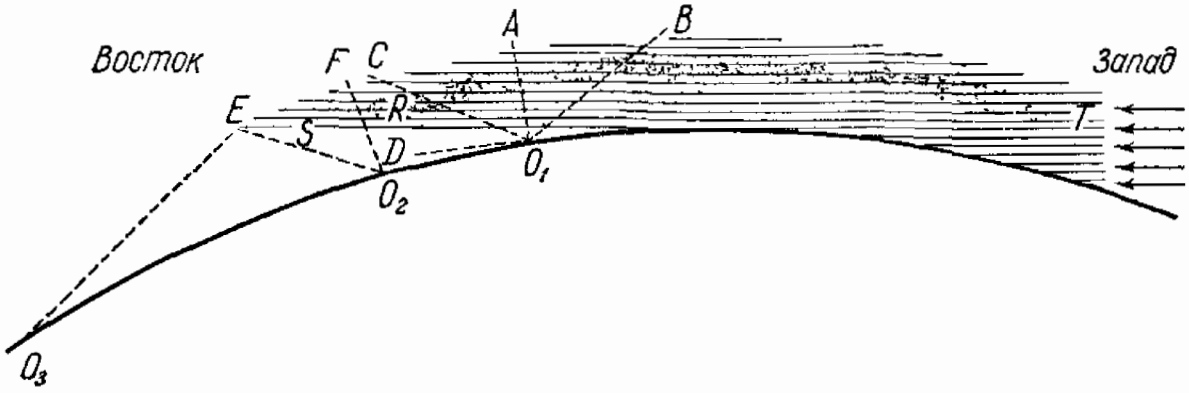



Рис. 166. Объяснение цветов зари.

$O_1B$ и $O_1C$ взгляд проходит длинный путь сквозь освещенные слои, и глаз будет получать значительное количество рассеянного света. Свет, приходящий из $B$, будет сильнее, поскольку, кроме света, рассеянного молекулами воздуха, отсюда идут лучи, рассеянные под малыми углами мелкими каплями и более крупными частицами пыли. В этом объяснение происхождения горизонтальных полос, направление которых соответствует «слоистому» распределению больших частиц. В то же время это объясняет восточную зарю в направлении $O_1C$ и смену цветов в ней от синего через зеленый и желтый в красный: если мы постепенно опускаем взгляд, он доходит до слоев, которые настолько плотны и протяженны, что пропускают лишь красный свет. Нам также понятно, что эти цвета будут насыщены, если солнечные лучи пройдут длинный путь вдоль $F$, чем были те, когда лучи освещали лишь только постройки около наблюдателя $O_1$. Еще ниже, вдоль $O_1D$, наш взгляд встречает земную тень, так что мы вообще не должны были бы получить свет из $D$, если бы объекты, лежащие в этом направлении, не освещались слабым диффузным светом от всего неба, скрадывающим все контрасты. Через некоторое время мы оказываемся в $O_2$. Так как здесь мы смотрим под бо́льшим углом к солнечным лучам, плоскость, разделяющая освещенную и неосвещенную часть атмосферы, не видна, а следовательно, не виден и красный край восточной зари. Количество света, приходящего из $E$, недостаточно, а более крутой луч из $F$ доставляет равные количества синего, желтого и красного. Ввиду этого граница освещенной части атмосферы становится все более размытой и неясной.

Еще позже наклон освещенных слоев атмосферы становится настолько крутым, что мы уже не видим красной окраски западного

неба. Мы должны вообразить, что наш наблюдатель находится в это время в $O_3$. Граница освещенной атмосферы $E$, которая сначала поднималась на восточном небе как граница земной тени, поднимаясь все выше и выше, проходит через зенит (хотя мы этого и не видим), и, поскольку направление нашего взгляда снова образует малый угол с плоскостью, разделяющей освещенную и неосвещенную части атмосферы, она появляется теперь на западе. Кроме того, снова вступает в игру рассеяние под малыми углами, а общая освещенность пейзажа падает настолько сильно, что даже и незначительная яркость оставляет впечатление. Именно поэтому мы и считаем $E$ верхней границей сумеречного сияния.

Так на первый взгляд всевозможные сумеречные явления можно удовлетворительно объяснить, исходя из простейших законов рассеяния. Однако при более тщательном изучении выясняется, что здесь существенны еще некоторые дополнительные факторы.

Недавно было сделано замечательное открытие *), приведшее к заключению, что земная тень приобретает свой фиолетовый оттенок главным образом за счет озона — газа, слой которого находится в атмосфере на значительной высоте. Во время сумерек световые лучи проходят такой длинный путь, что лиловый цвет озона становится заметным.

Наконец, остается объяснить пурпуровый свет. Он может быть объяснен лишь предположением, что на высоте от 15 до 25 *км* существует слой $ST$ тончайшей пыли (рис. 166) **). Пучок лучей света, благодаря которому мы видим этот слой освещенным, приходит от Солнца, когда оно уже под горизонтом. Нижняя часть этого пучка будет иметь интенсивный красный цвет, так как эти лучи прошли большой путь в плотных слоях воздуха. Таким образом, участок слоя $SR$ будет ответствен за бо́льшую часть пурпурового света. Замечательно, что рассеяние в $SR$ видимо лишь из $O_3$, но не из $O_1$ (где оно должно было наблюдаться на востоке). Отсюда можно заключить, что рассеивающие частицы значительно больше, чем молекулы воздуха, и рассеивают главным образом вперед (ср. § 189). Когда бы мы ни отмечали вечером появление пурпурового света, это всегда следует считать указанием, что мы находимся в пучке лучей, рассеиваемых вперед пылевым слоем.

Зимой асимметрия пурпурового света особенно заметна, если небо достаточно ясное. Наиболее высокие части свечения бывают сдвинуты к югу, а южный край при этом очерчен резче, чем северный. Это наблюдается как утром, так и вечером. С асимметрией подобного же рода мы встретимся, рассматривая Зодиакальный свет (§ 223).

---

*) J. Dubois, C. R. Paris **222**, 671, 1946; **226**, 1180, 1948.

**) P. Gruner, Helv. Phys. Acta **5**, 351, 1932 (наличие пылевого слоя на высоте ~20 *км* подтверждено наблюдателями со спутников.) (*Прим. ред.*)

Некоторые из этого делают вывод, что наша атмосфера в плоскости орбиты Земли поднимается выше и что эта воздушная оболочка вокруг Земли благодаря рассеянию света придает небу пурпуровый цвет. Эта теория разработана еще не до конца.

## 214. Есть ли различия между рассветом и закатом?

Если они и есть, то настолько малые, что каких-либо реальных типичных различий заметить не удается. Важно, однако, что утром глаз совершенно отдохнувший; кроме того, наблюдается постепенно увеличивающаяся интенсивность света. Таким образом, во время рассвета глаз более чувствителен. Однако закат, вообще говоря, богаче цветами в соответствии с большей влажностью и в связи с тем, что вечером из-за несколько большей турбулентности воздух содержит больше пылевых частиц, чем утром *).

## 215. Изменения освещенности во время сумерек

Нам уже известно, как огромно уменьшение силы света при смене дня и ночи. Приведем еще раз данные об освещенности горизонтальной плоскости при различных высотах Солнца.

| Высота Солнца | 0° | −1° | −2° | −3° | −4° | −5° | −6° | −8° | −11° | −17° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Освещенность в люксах | 400 | 250 | 115 | 40 | 14 | 4 | 1 | 0,1 | 0,01 | 0,001 |

Вместе с изменением освещенности меняется не только весь ландшафт, но и состояние наблюдателя, ибо его зрение переключается с колбочек на палочки. Следующая таблица дает нам представление об этих изменениях.

| | Высота Солнца |
|---|---|
| Розовые облака исчезают в зените | −3°,6 |
| Пепельный свет Луны становится наблюдаемым | −7 |
| Невозможно прочитать текст, написанный карандашом | −7,6 |
| Красная бумага кажется черной | −7,6 |
| Голубая бумага кажется серой | −8,3 |
| Желтая бумага кажется серой | −9,7 |
| Млечный Путь становится видимым в зените | −11,7 |

Как видите, сумерки хорошо можно использовать для наблюдений при всевозможных степенях яркости и сравнения слабых световых явлений друг с другом.

---

*) Zs. f. angew. Meteor. **54**, 1937.

## 216. «Темнее всего перед рассветом» *)

Деннинг, знаменитый наблюдатель метеоров, верит в справедливость этой английской пословицы. Перед самым рассветом он чувствует себя несколько беспокойно, предметы, которые, как он был уверен, были отчетливо видны, теперь кажутся исчезнувшими.

Измерения освещенности действительно показали неправильные изменения светимости ночного неба со временем, однако они слишком непостоянны и слишком малы, чтобы иметь реальное значение. Первый проблеск рассвета, вероятно, нарушает адаптацию глаза, хотя он слишком слаб и охватывает чересчур малый участок, чтобы ощутимо увеличить освещенность.

## 217. Утренняя и вечерняя заря как приметы погоды **)

*Он же сказал им в ответ: «вечером вы говорите: будет ведро, потому что небо красно;*
*и поутру: сегодня ненастье, потому что небо багрово. Лицемеры! различать лицо неба вы умеете, а знамений времени не можете?»*

*(Евангелие от Матфея, XVI)*

Это древнее и универсальное правило, как показывает современная статистика, в большинстве случаев действительно выполняется.

Объяснение несколько различно в разных случаях. Красный закат означает, что воздух чист на западе и, так как условия погоды перемещаются, вообще говоря, с запада на восток, мы можем ждать хорошей погоды; по-видимому, цвет неба усиливается, если красные лучи Солнца освещают последние облака уходящей депрессии. Но если депрессия приближается с запада, темные облака отбрасывают тени на большое пространство и вечернее небо кажется бледным, коричнево-желтым. Красный восход означает, что к востоку от нас нет больших скоплений облаков. Цвет усиливается, когда над нами проходят перистые облака, возможно, предвещающие новую депрессию. Горизонтальные полосы красны только тогда, когда воздух содержит пыль или капли воды; утром пыли немного, и красный цвет должен вызываться водой. При высоком давлении и хорошей погоде вечером небо ясно, и мы видим пурпуровый свет; утром в таком случае часто бывает легкий туман.

Твое солнце, обливаясь слезами, совсем склоняется к западу, предвещая будущие бури, несчастья и беспорядки.

(Шекспир, Жизнь и смерть Ричарда II, действие II)

---

*) Month. Weather Rev. **42**, 503, 1914.

**) A. H. Borgesius, Hemel en Dampkring **17**, 145, 1920; D. J. Schove, Weather **4**, 274, 1949.

## 218. Нарушения нормального течения сумерек

Сумеречные явления — чрезвычайно тонкий инструмент для исследования чистоты высоких слсев воздуха. Необычные краски солнечных восходов и закатов в 1883—1886 гг. были прямым следствием присутствия вулканического пепла, выброшенного высоко в воздух во время извержения вулкана Кракатау в Индонезии и распространившегося в течение нескольких месяцев по всей Земле. Но и до этого и после случались меньшие оптические возмущения, которые обычно связывают с вулканическими извержениями: 1831 г.— Пантелярия, близ Сицилии; 1902—1904 гг.— Монпеле; 1912—1914 гг.— Катмаи на Аляске. После каждого сильного извержения Везувия или Этны мы можем ожидать необычайных сумерек, хотя, как правило, требуется больше недели, чтобы тончайший вулканический пепел достиг наших мест *).

Кажется весьма вероятным, что сильное развитие пятен и протуберанцев на Солнце вызывает возмущения в сумеречных явлениях, ибо воздействие ионов, извергаемых Солнцем, может вызывать ионизацию в нашей атмосфере. По этой теории, максимумы возмущений должны совпадать с максимумами солнечной активности.

Третья причина возмущений была открыта, когда Земля проходила через хвост кометы Галлея 18 и 19 мая 1910 г. Великолепные сумеречные явления были, по-видимому, свидетельством внедрения в нашу атмосферу пылевых частиц из кометы (§ 188). Столь же сильные явления наблюдались в 1908 г., когда Земля столкнулась с гигантским метеоритом, упавшим в пустынных пространствах Сибири. Прекрасные сумеречные цвета наблюдались над всей Европой.

Главные оптические явления, указывающие на период возмущений, таковы:

а) «Кольцо Бишопа». В течение всего дня Солнце находится в центре светлого синевато-белого диска, окруженного красно-коричневым кольцом **). Наиболее яркая часть кольца имеет радиус около 15°. Когда Солнце очень низко, кольцо Бишопа превращается в треугольник с горизонтальным основанием Тот факт, что перистые облака видны проходящими перед кольцом, указывает, что оно возникает очень высоко в атмосфере.

б) Похожее медно-красное кольцо можно видеть иногда вокруг точки, противоположной Солнцу; его радиус около 25° ***).

в) Небо кажется мутным и белесым, Солнце близ горизонта — из-за того, что оно светит сквозь слой дымки,— тускло-красным. Звезды шестой и даже пятой величины не видны ****).

---

*) Astr. Nachr. **220**, 15, 1923.
**) D o r n o, Meteor. Zs. **34**, 246, 1917.
***) Hemel en Dampkring **10**, 156, 1913.
****) Nature **91**, 681, 1912.

г) Необычайно мало гало.

д) Необычайно ясные ночи.

е) Необычайно сильный, пламенный пурпуровый свет.

ж) Второй пурпуровый свет. Это — изменение в ходе сумерек. Когда пурпуровый свет затухнет и Солнце спустится на 7—8° под горизонт, на том месте, где сперва появился пурпуровый свет, появляется слабое красно-фиолетовое сияние, которое развивается сходным образом и затухает, когда Солнце опускается на 10—11° под горизонт.

з) Ультрацирусы (§ 220).

и) Светящиеся ночные (серебристые) облака.

к) Луна имеет зеленоватый оттенок *).

Даже непосвященные поражаются этим явлениям, когда они выражены резко. Но для наблюдения тонких различий, вследствие которых никогда не бывает двух одинаковых закатов и которые служат очень чувствительным указанием на легчайшие возмущения оптических явлений, необходима большая практика **).

## 219. Ореол вокруг Солнца ***)

Если стать лицом к Солнцу так, что само Солнце закрыто вершиной крыши, мы увидим вокруг него сияние, постепенно ослабевающее к наружному краю. Оно же может отчетливо наблюдаться в садовом шаре, если отойти от него на несколько метров так, чтобы ваша голова заслоняла изображение Солнца. Некоторые наблюдатели утверждают, что такое сияние состоит из двух частей: а) серебристо-белого диска радиусом 2—5°, чрезвычайно изменчивого, возникающего главным образом после полудня; б) значительно бóльшего сияния, с радиусом, достигающим 30—40°, едва ли когда-либо отсутствующего и превращающегося в сумерки в сияние зари. Другие различают желтовато-белый ореол с радиусом от $^1/_4$ до 2°, синевато-белую «корону» от 2° до 5°, «центральный диск» от 15 до 23°, «внутренний диск» от 10 до 40° и «внешний диск» от 25 до 70°. Размеры сильно зависят от высоты Солнца и изменяются ото дня ко дню. Например, когда Солнце очень низко — меньше 2° над горизонтом,— то кажется, что его сопровождает ореол, имеющий тусклые желтые лучи. Этот ореол исчезает, когда Солнце ниже 1° над горизонтом ****).

Точное фотометрическое исследование околосолнечного света проводилось редко. По всей вероятности, то, что кажется кольцом, есть просто более медленное уменьшение интенсивности света, в общем постепенно убывающей с увеличением расстояния от Солнца.

---

*) Ann. Soc. Mét. France **53**, 1903.

**) См. C. D o r n o, Abh. Preuss. Met. Inst. **5**, 1917.

***) J. M a u r e r, Meteor. Zs. **32** и **33**, 1915—1916.

****) J. P l a s s m a n, Meteor. Zs. **48**, 421. 1931.

Этот свет, без сомнения, вызывается рассеянием света Солнца на частицах пыли, каплях воды или кристаллах льда, которые рассеивают главным образом под малыми углами (§ 189). Ввиду того, что частицы бывают различных размеров, ореолы и венцы накладываются друг на друга, и говорить о цветах весьма затруднительно. Изменение яркости и распределения света в околосолнечном ореоле служит критерием чистоты воздуха, которым стоит пользоваться. В то же время эти изменения тесно связаны с сумеречными явлениями и могут служить указанием на оптические возмущения в атмосфере.

Если в воздухе присутствует вулканический пепел, вокруг ореола появляется размытое коричнево-красное кольцо — кольцо Бишопа (§ 218).

### 220. Сумеречные перистые облака или ультрацирусы *)

Изредка небо перед самым заходом кажется безоблачным, а затем через некоторое время показываются очень нежные волнистые облака, располагающиеся низко на западном горизонте и имеющие синевато-серый цвет. Замечательно, что они, по-видимому, видны только в момент захода Солнца и затем появляются снова, когда его высота равна —3 и —7°. Вероятно, это означает, что они должны освещаться в определенных направлениях. Такие наблюдения, однако, проводились слишком редко, чтобы можно было придавать им общее значение. Появление ультрацирусов обычно сопровождается чрезвычайно красочным закатом и оптическими возмущениями. Можно предполагать, что ультрацирусы состоят из вулканического вещества. Эти облака настолько тонки, что не видны днем, но появляются при закате, очевидно, благодаря яркому освещению на темном фоне. Поскольку они были видны на высоте до 10° над горизонтом, когда высота Солнца равна —7°, их расстояние от поверхности Земли не может намного превышать 10 *км*. Это означает, что они находятся в нижних слоях стратосферы.

### 221. Серебристые облака **) (фотография XXI)

Это — очень тонкие облака, гораздо более высокие, чем все другие виды. Они наблюдаются и при нормальных атмосферных условиях, но лучше всего при оптических возмущениях. Удивительно,

---

*) M. W o o l f, Meteor. Zs. **33**, 517, 1916.

**) O. J e s s e, Meteor. Zs. 1884—1892; E. H. V e s t i n e, J. Roy. Astr. Soc. Canada **28**, 1934; C. S t ö r m e r, Univ. Obs. Oslo, Publ. № 6, 1933; Astrophys. Norvegica **1**, 87, 1935; R. S ü r i n g, Naturwiss. **23**, 555, 1935. См. также R. S ü r i n g, Die Wolken, Leipzig, 1936, S. 30 (литература); D. K o e l b l o e d, Hemel en Dampkring **33**, 175 и 241, 1935.

что они видны только между 45 и 60° северной и южной широты, особенно в период от середины мая до середины августа. На наших широтах их следует наблюдать в конце июня.

Пока Солнце еще не зашло, небо кажется совершенно чистым. Приблизительно через четверть часа после захода Солнца светящиеся облака начинают появляться или в виде нежных перьев, или в виде ряби, или полос; они виднее всего спустя час или более после захода Солнца. *На фоне сияния зари (§ 210) они представляются* я р к и м и, в то время как обычные перистые облака — т е м н ы е. Очевидно, эти облака все еще купаются в солнечном свете и, следовательно, должны быть высоко в стратосфере; собственно говоря, сами по себе они не должны излучать свет. Их синевато-белый цвет можно наблюдать часами, но чем позже, тем меньше освещенная поверхность слоя и тем ниже он над горизонтом; в полночь свечение минимально, а затем, по-видимому, становится ярче. Эти облака редко видны выше 10° над горизонтом.

Высота Солнца, на которой они наблюдались, меняется от —16 до —10°.

Их загадочный серебристо-белый блеск, превращающийся близ горизонта в золотисто-желтый, производит большое впечатление. Частицы, образующие эти облака, должны, очевидно, быть очень мелкими и рассеивающими главным образом синий свет. Это явствует из того факта, что облака видны сквозь синее, но не сквозь красное стекло. Отсюда понятно, почему они не окрашиваются красным сиянием зари: только лучи, проходящие в нашей атмосфере настолько высоко, что они не испытывают покраснения, могут рассеиваться ночными облаками. Некоторые наблюдатели утверждают, что их свет неполяризован, в то время как другие говорят об очень сильной поляризации *) (с колебаниями, перпендикулярными к плоскости, проходящей через Солнце, облако и Землю, т. е. так же, как в свете неба и при различных процессах рассеяния). Может быть, светящиеся ночные облака состоят иногда из бóльших, иногда из меньших частиц?

Высоту серебристых облаков можно определить по наблюдениям верхней границы освещенной части, которую предпочтительно проводить при различных положениях Солнца под горизонтом. В одном случае было найдено, что высота $\alpha$ верхней границы над горизонтом составляла 10, 5 и 3°, когда погружение Солнца под горизонт $\beta$ соответственно было равно 12, 13 и 14°. Для высоты ночных облаков легко выводится формула

$$h = \frac{R}{4}\beta^2\left(\frac{2\alpha+\beta}{\alpha+\beta}\right)^2,$$

где $R$ — радиус Земли, а $\alpha$ и $\beta$ выражены в радианах.

*) Meteor. Zs. **25**, 1908.

Высóты, полученные таким путем, должны быть несколько завышены, так как лучи, почти касающиеся Земли, не рассеиваются. Более точные результаты дает фотографирование из двух точек; в большинстве случаев облака находятся на высоте 75—90 *км*. Зная высоту, можно найти действительное расстояние между полосами, характерное для этих облаков; оно составляет в среднем 6—9 *км*.

Важность изучения серебристых облаков подчеркивается тем обстоятельством, что они служат хорошим средством изучения течений в верхних слоях нашей атмосферы. Если нельзя получить фотографии, скорость облаков можно определить при помощи зеркала. Обычно они движутся с северо-востока со скоростью 40—80 *м/сек*, иногда с запада-северо-запада со скоростью 30 *м/сек*. Были измерены скорости до 300 *м/сек*!

Согласно общепринятой прежде теории явление светящихся ночных облаков вызывается вулканической пылью, забрасываемой сильными извержениями высоко в атмосферу. Однако оно наблюдается так часто, что можно также приписать его другой причине, а именно, очень тонкой пыли из окружающей нас области Вселенной, которая вносится в нашу атмосферу «падающими звездами» (метеорами); возможно также, что кометы, проходящие близ Земли, оставляют за собой большое количество космической пыли. За падением большого метеорита, выпавшего в Сибири в 1908 г., немедленно последовало появление очень сильных ночных облаков. В других случаях более вероятно вулканическое происхождение пыли *).

Для фотографирования этих облаков желательна широкоугольная камера. При светосиле 1 : 3 брались выдержки 16, 35, 72 и 122 *сек*, когда Солнце было соответственно на 9, 12, 14 и 15° под горизонтом **).

## 222. Ночные световые явления

Для изучения самых слабых форм сумеречных явлений мы должны начать ночью, когда глаза хорошо отдохнули, наблюдать ранние стадии рассвета. Выберем безлунную ночь с совершенно безоблачным небом в мае или августе — сентябре и место, как можно более далекое от жилья. Нелегко нарушить нашу обычную привычку и начать трудовсй день в полночь несколькими часами наблюдений вне дома. Но если эта трудность преодолена, мы будем сторицей вознаграждены великолепным зрелищем, развертывающимся перед нами.

---

*) См. обсуждение: R. S ü r i n g, Die Wolken, Leipzig, 1936, S. 30—36.

**) Высказывалась также гипотеза, что серебристые облака обязаны своим образованием возникновению водяного пара из ионов водорода, приходящих к Земле от Солнца (см. И. А. Х в о с т и к о в, Природа, № 5, 1952).

Городской житель не представляет себе, как выглядит сияние усыпанного звездами неба. Способность нашего глаза приспосабливаться к темноте совершенно удивительна: насколько больше звезд мы видим спустя час, чем сразу по выходе из дома! Можно подумать, что все небо светится. Это удобный момент для наблюдения очень слабых световых явлений, часть которых можно всегда видеть вполне отчетливо, другие же обычно не видны.

Прежде всего мы, вероятно, увидим в разных местах низко у горизонта слабое сияние. Это — отражение огней далеких городов и деревень. В некоторые ночи оно яснее, чем в другие, в соответствии с облачностью, дымкой и ясностью неба. Эти факторы легко учесть, если наблюдения всегда ведутся с одного и того же места.

Поперек неба подобно ленте проходит *Млечный Путь*, состоящий из больших и малых светящихся облаков, разделенных темными промежутками. Для того, кто никогда не наблюдал прежде настоящей звездной ночи, будет неожиданна яркость некоторых его частей.

Иногда видны широкие *яркие полосы* *). Дважды в год — в августе и в декабре — они, по-видимому, появляются особенно часто. Их появление, возможно, соответствует большим метеорным потокам, которые (как мы знаем) состоят из пылевых частиц. Так, например, эти светящиеся полосы можно наблюдать 15—16 ноября, во время потока Леонид. Возможно, что в эти периоды облака тонкой пыли проникают из межпланетного пространства в нашу атмосферу. Светящиеся полосы парят на высоте 90—180 *км* и движутся очень медленно, со скоростью в зените, не превышающей 1° в минуту.

Несколько раз в году у нас видно *северное сияние*, по крайней мере в годы большой солнечной активности: в 1948—1949 и в 1957—1958. Оно появляется на северной части неба в виде дуг, пучков лучей и т. д.; лучи часто быстро передвигаются, увеличиваясь и уменьшаясь в длине. Не спутайте их с лучами далеких прожекторов! Полярное сияние — электрическое явление и не описывается в этой книге, посвященной собственно оптическим явлениям.

Вдоль зодиакального круга яркость неба увеличена из-за *Зодиакального света*, особенно сильного вблизи Солнца и быстро ослабевающего с приближением к противосолнечной точке. Она напоминает косую световую пирамиду, поднимающуюся из-за горизонта и видимую особенно хорошо весной на западе после захода Солнца, осенью — на востоке перед его восходом (ср. § 223).

Независимо от всех этих явлений фон неба светится. Очертания вашей руки, силуэты деревьев и построек кажутся на нем темными. Пятьдесят процентов этой яркости объясняются общим действием

---

*) C. Hoffmeister, Die Sterne **11**, 257, 1931; Sitz. Akad. München, 129, 1934; Die Meteore, Leipzig, 1937.

миллионов невидимых слабых звезд, пять процентов — рассеянием света звезд в атмосфере Земли, остающаяся часть свечением ночного неба — *земным светом*.

Фон неба становится светлее к горизонту, повсюду окаймленному «земным светом», достигающим наибольшей яркости на высоте около 15°. Это своеобразное непрекращающееся сияние в нашей атмосфере. Чем ближе к горизонтали наш взгляд, тем больше расстояние, которое проходит наш взгляд в светящемся слое и тем ярче земной свет. Тот факт, что его яркость убывает близ самого горизонта, следует приписать ослабляющему действию воздуха.

Яркость ночного неба, без сомнения, не остается постоянной. В некоторые ночи, даже в отсутствие Луны, она в четыре раза превышает обычную; можно даже посмотреть, который час и различить большие буквы. Эту изменчивость следует приписать изменениям интенсивности земного света; они в свою очередь объясняются переменной интенсивностью потоков электронов и ионов, которыми Солнце «обстреливает» нашу атмосферу.

Обратимся теперь к наблюдению *ночных сумеречных явлений*. Рассмотрим кайму земного света в северной части неба. Здесь она постепенно поднимается приблизительно на 10°, достигая максимальной ширины где-то над точкой, в которой находится невидимое под горизонтом Солнце. Это — ночное сияние зари *). Его можно узнать по тому признаку, что в течение ночи оно неизменно передвигается к востоку. Его высота над Солнцем порядка 40°; в наиболее благоприятных условиях (в Гренландии) оно наблюдается до высоты 55°. Таким образом, в наших широтах ночи летом никогда не бывают совершенно темными; сумерки длятся в действительности в продолжение всей ночи. Темно наше небо лишь зимой. Очевидно, тропическое небо ночью так черно потому, что Солнце там круто и глубоко спускается под горизонт. В других местах, наоборот, ночные сумерки необычно сильны **).

За два с половиной часа до восхода Солнца сияние становится асимметричным. Оно поднимается на востоке все круче, принимая через некоторое время форму наклоненного светового конуса — это Зодиакальный свет; его ось имеет практически тот же наклон, что и эклиптика (§ 223).

Приблизительно за два часа до восхода, когда Солнце еще погружено под горизонт на 20°, у основания Зодиакального света, несколько правее Солнца, появляется очень слабый синеватый свет. Он наблюдается лишь с трудом и, медленно поднимаясь, постепенно перемещается влево, к Солнцу (рис. 167). Это — *раннее сумеречное*

---

*) Gruner und Kleinert, Die Dämmerungserscheinungen, Hamburg, 1917, S. 6.

**) M. Wolf, Astr. Nachr. **203**, 387, 1915.

*сияние,* которое за полчаса достигает зенита. Заревые дуги обычно располагаются вертикально над Солнцем. Кажущееся смещение ранней зари вправо объясняется тем, что ее яркость складывается с яркостью расположенного правее Зодиакального света. Однако чем сильнее она становится, тем более преобладает, пока не займет свою

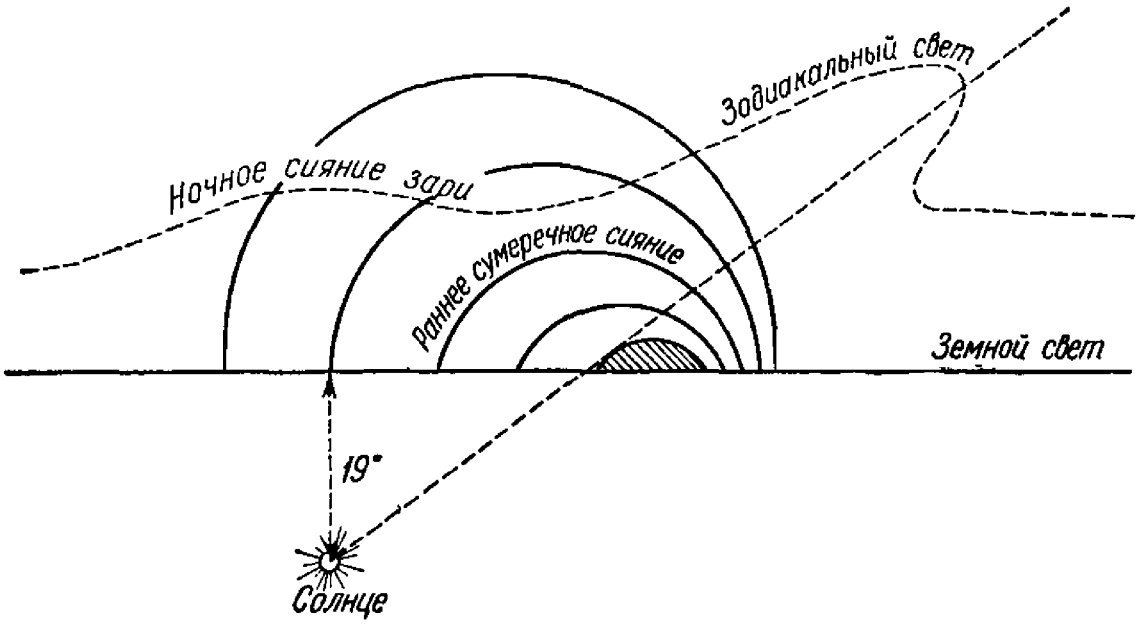



Рис 167 Ночные сумеречные явления.

нормальную позицию над Солнцем. Далее заря продолжает сопровождать Солнце в его дневном движении, медленно перемещаясь вместе с Солнцем все более и более вправо

Более слабые звезды (пятой величины) постепенно исчезают, более яркие еще заметны; можно различить главные детали в окрестностях. На западе сильно выделяется западная заря, появляется желтое сумеречное сияние, принимающее у вершины сине-зеленый оттенок. Начинаются собственно сумерки: высота Солнца —17°, —16° (далее см. § 210).

В другие времена года ход явлений остается таким же; изменяется лишь погружение Солнца. В середине июня, например, в наших широтах Солнце не спускается под горизонт ниже 10—15°, так, что явления, возникающие при бо́льшем погружении Солнца, не видны.

### 223. Зодиакальный свет *)

Когда кончаются вечерние сумерки или начинаются утренние, в определенные месяцы можно видеть мягко светящийся Зодиакальный свет, поднимающийся из-за горизонта наклоненной закругленной пирамидой. Чем круче его подъем, тем лучше он наблюдается.

*) Fr. S c h m i d, Das Zodiakallicht, Hamburg, 1928; W. B r u n n e r, Publ. Sternw. Zürich, 1935; S a n d i n g, Astr. Nachr. 272, 1, 1941

Наиболее удобно наблюдать его в январе, феврале и марте вечером на западном небе и в октябре, ноябре и декабре — ранним утром на восточном небе (это, правда, не столь удобно, как вечером). В июне и июле Зодиакальный свет вообще не виден в наших широтах: в это время Солнце не опускается достаточно глубоко под горизонт, и Зодиакальный свет невозможно отличить от продолжительных сумеречных явлений. Чтобы определить положение Зодиакального света, следует найти пояс Зодиака — большой круг, проходящий через созвездия: Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы.

Это — тот видимый путь, который Солнце проходит в течение года. Мы не можем, конечно, видеть созвездие в тот момент, когда в нем находится Солнце, но когда оно заходит и наступает темнота, остающаяся часть Зодиака становится видимой. Вдоль этого круга простирается свсеобразная светящаяся пелена, наиболее яркая и широкая вблизи Солнца, быстро суживающаяся с удалением от него. С одной стороны от Солнца располагается часть Зодиакального света, видимая ранним утром, по другую сторону — наблюдаемая вечером. Опытный наблюдатель может видеть Зодиакальный свет и утром и вечером в продолжение шести зимних месяцев.

Сам свет слаб — приблизительно такой же, как Млечный Путь,— однако не так «зернист» и более «молочен». Необходима практика, чтобы его увидеть. Конечно, не должно быть Луны, и любая лампа, даже далекая, служит помехой; даже яркие планеты, подобные Венере и Юпитеру, могут мешать наблюдателям. Не следует наблюдать близ больших городов; лучше всего выбрать возвышенное место с открытым во всех направлениях горизонтом.

Сначала следует нанести на звездную карту очертания Зодиакального света относительно хорошо известных вам звезд, а затем провести линии равной яркости. Центральная часть наиболее ярка; яркость постепенно убывает к вершине и к краям, более резко на севере, чем на юге, так что область наибольшей яркости смещена к югу относительно оси симметрии более слабых частей. При помощи подобных грубых рисунков можно оценить размеры области, охваченной этим световым явлением. Измеренные под прямым углом к оси, они составляют 40, 20 и 10° на расстоянии соответственно 30, 90 и 150° от Солнца.

Тот, кто предпримет труд пронаблюдать в течение всей ночи Зодиакальный свет, будет вознагражден и удивлен очень красивыми изменениями развивающегося перед ним зрелища. Приблизительно через два часа после захода Солнца, когда его высота —17°, становится заметен очень слабый клиновидный световой конус, наклонно поднимающийся к юго-западу. Когда Солнце опускается до —20°, становится настолько темно, что можно наблюдать громадную световую пирамиду. Этот западный Зодиакальный свет в те-

чение ночи распространяется все выше и шире. Его положение относительно звезд остается в целом одним и тем же. Все же некоторое смещение ощутимо: звезды, которые располагались несколько к югу, позже меняют свое положение в Зодиакальном свете на более северное. Лучшее время для наблюдения этого любопытного явления — первая половина зимы.

Постепенно западный Зодиакальный свет начинает заходить, и на востоке появляется восточный Зодиакальный свет. Приблизительно в полночь наступает удобный момент для поисков знаменитого *противосияния* — одного из наиболее трудных для наблюдения явлений, которое можно надеяться увидеть лишь в очень темные ясные зимние ночи. В противосолнечной точке, которая практически находится на юге, наблюдается очень слабый световой мост, соединяющий вершины западного и восточного Зодиакального света *). Позже можно видеть, как восточный Зодиакальный свет движется вместе с звездами, в то же время несколько смещаясь относительно них: звезды кажутся передвигающимися с северной на южную сторону пирамиды. Это происходит так, как если бы Зодиакальный свет участвовал в суточном вращении неба, чуть-чуть отставая от звезд.

Близится день: когда Солнце погружено под горизонт на 20 или 19°, кажется, будто основание пирамиды восточного Зодиакального света становится шире и ярче. Когда оно погружено на 19—17°, начинается ранняя утренняя заря.

Зодиакальный свет — более сложное явление, чем думали вначале. Оно возникает в основном из-за сочетания двух причин:

1. Громадный диск космической пыли и газа окружает Солнце и рассеивает его свет; мы видим это освещенное Солнцем облако пыли тем более ярким, чем ближе к Солнцу проходит луч зрения.

2. Ночные сумерки (§ 222), которые можно рассматривать как очень слабый свет, рассеянный наиболее высокими слоями атмосферы, и, таким образом, представляющий собой последнюю стадию вечерних сумерек. Яркость этого света также возрастает вблизи Солнца, но гораздо более медленно, чем у космической составляющей; в этом случае изофоты огибают Солнце, как и при сумеречных явлениях; Зодиакальный свет не показывает такого эффекта.

Сочетание явлений (1) и (2) образует «типичную» световую пирамиду Зодиакального света, и изменение положения горизонта и Зодиака позволяет объяснить, почему это световое явление смещается в течение ночи и года; смещение зависит также от географического положения места наблюдения. К этому следует также добавить свечение, известное как «земной свет» (§ 222), с максимумом интенсивности около 15° над горизонтом. Наконец, погло-

*) Hemel en Dampkring **38**, 422, 1940; **41**, 239, 1943.

щение света в атмосфере Земли ответственно за уменьшение свечения к горизонту.

Если бы облако космической материи, создающей Зодиакальный свет, образовывало кольцо вне орбиты Земли, это кольцо должно было бы светиться так же ярко близ противосияния, как и с другой стороны, в $Z$ (рис 168) Однако это не так Зодиакальное облако газа и пыли имеет чечевицеобразную форму, плоскость симметрии этого облака располагается близ эклиптики Оно простирается

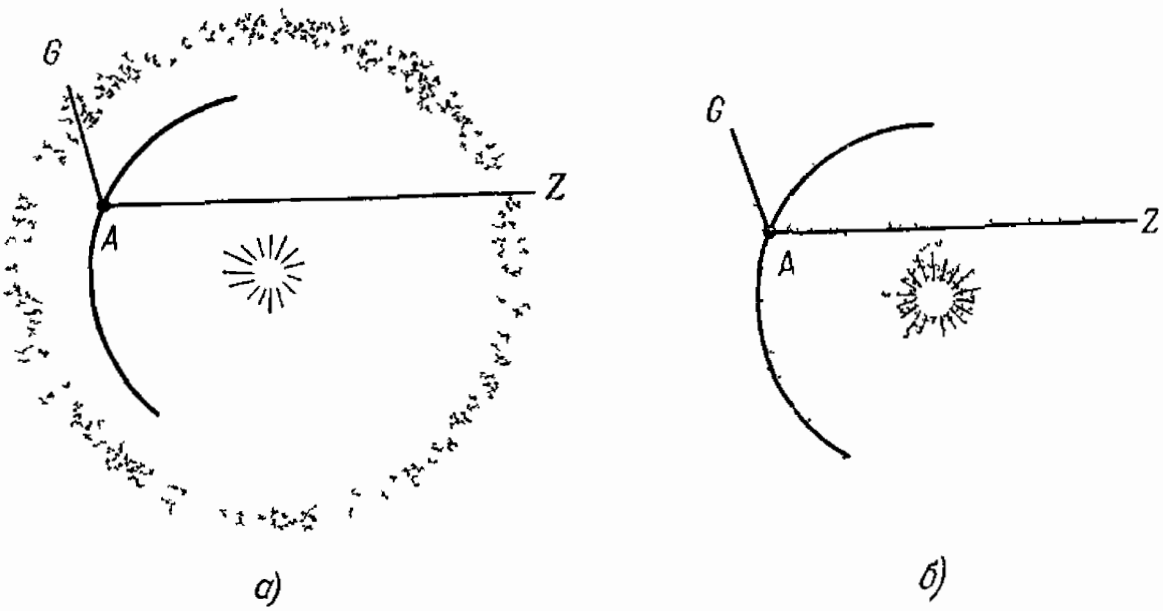



Рис 168 Две теории происхождения Зодиакального света: *а*) кольцо космической пыли вне земной орбиты, *б*) диск космической пыли вокруг Солнца

далеко за орбиту Земли — по крайней мере до орбиты Юпитера. Плотность в облаке растет по направлению к Солнцу, хотя внутри орбиты Венеры рост плотности, возможно, сменяется убыванием. Из-за сумерек мы не можем наблюдать Зодиакальный свет ближе 30° от Солнца; на бóльших угловых расстояниях яркость его убывает, так как рассеяние при больших углах становится слабее и плотность облака в его внешних частях уменьшается

Пылевые частицы, рассеяние на которых образует Зодиакальный свет, это те же частицы, которые мы наблюдаем как метеоры, когда они пронзают нашу атмосферу.

Быстрые изменения яркости, отмечавшиеся некоторыми авторами, связаны или с субъективными иллюзиями или с накладывающимися изменениями свечения ионосферы

Фесенков и некоторые другие авторы утверждают, что Зодиакальный свет частично объясняется рассеянием в атмосфере Земли, которая под влиянием светового отталкивания от Солнца образует как бы хвост, конец которого мы видим как противосияние Эта теория, если она вообще верна, может играть лишь малую роль в объяснении явления Другие авторы объясняют противосияние скоплением метеоритной пыли на определенном расстоянии позади Земли

## 224. Затмения Луны *)

Затмения Луны вызываются тенью Земли, падающей на Луну Не следует ли попытаться выяснить, как выглядит эта тень? С этой точки зрения затмение Луны действительно есть средство, при помощи которого можно кое-что выяснить о нашей Земле

Нет двух одинаковых лунных затмений Очень редко затмение бывает настолько темным, что Луна вовсе не видна на ночном небе. Центр тени обычно окрашен в блеклый медно-красный цвет и окружен цветами возрастающей яркости Иные наблюдатели различают. *темную внутреннюю часть* —

0—30′— красновато-черную, к внешнему краю — более яркую коричневато-оранжевую,

30—41′ — серая кайма постоянной яркости,

41—42′ — переходная полоса,

*яркую внешнюю часть* —

временами она наблюдается окрашенной в различные медные и розовые цвета, иногда с зеленоватым оттенком

Эти цвета, а также их изменения, заставляют предположить, что здесь мы имеем дело не с обычной тенью Действительно, более тщательное исследование показывает, что тень земного шара не может вызвать затмение Луны, так как из-за искривления лучей в нашей атмосфере они более или менее изгибаются у Земли! «Тень Земли» в этом случае — это не что иное, как лучи света, прошедшие сквозь нижние слои нашей атмосферы до высоты приблизительно в 10 *км* и ставшие поэтому темно-красными Это происходит таким же образом, как изменение цвета солнечных лучей в сумерки, когда лучи приходят к нам сквозь плотные слои атмосферы, только цвет оказывается более темным из-за того, что теперь световые лучи проходят в атмосфере двойное расстояние Тем самым цвет центральной части тени Земли указывает степень прозрачности нашей атмосферы. Поэтому Луна во время затмения кажется особенно темной, когда наша атмосфера содержит значительные количества пыли из-за вулканических извержений Затмение Луны также в среднем темнее, когда Луна проходит через северную часть тени Земли, чем когда она проходит через южную, так что, по-видимому, в северном полушарии больше вулканической и песчаной пыли, чем в южном

Можно просто судить о яркости лунного затмения, используя тот замечательный факт, что когда интенсивность света мала, наш глаз не может больше различать тонкие детали например, в то время как в сумерки большие газетные заголовки все еще читаются, обыч-

*) Freeman, Nature **15**, 398, 1877 H Meyer-Buhrer, Astr Nachr. **229**, 229, 1927, W J Fischer, Science **70**, 404, 1929, Линк Ф, Лунные затмения, ИЛ, 1962

ный шрифт уже неразличим. Подобно этому, мы отмечаем, остаются ли во время затмения большие области на лунной поверхности (так называемые «моря»), которые обычно кажутся серыми пятнами, видимыми: а) невооруженным глазом, б) в небольшой телескоп с диаметром объектива от 5 до 15 *см*, в) в больший телескоп.

Эти три оценки достаточны, чтобы позволить нам грубо подразделять затмения на светлые, средние и темные. Систематическое сравнение оценок, полученных в течение многих лет, может дать материал для многочисленных интересных выводов.

## 225. Пепельный свет *)

Вскоре после появления молодой Луны мы можем видеть слабо освещенную остальную часть лунной поверхности (рис. 91). Этот «пепельный свет» приходит от Земли, которая освещает Луну подобно большому и яркому источнику света. Замечательно, что пепельный свет не всегда одинаково силен. Временами он почти не виден, временами же он молочно-белый и настолько ярок, что можно различить более темные пятна, обычно наблюдаемые на поверхности Луны. Изменения интенсивности пепельного света приписываются тому, что обращенная к Луне половина земной поверхности занята то преимущественно океанами, то материками; меняется и облачный покров. Таким образом, посмотрев на пепельный свет, мы можем получить общее представление об условиях на целой половине земного шара!

Оценивайте систематически силу пепельного света по десятибальной шкале (*1*— невидим, *5*— хорошо видим, *10*— исключительно яркий). Вы очень скоро заметите, что видимость сильно зависит от фаз Луны: уменьшается часть Земли, освещающая Луну; кроме того, яркий серп слепит нас, когда он становится шире. Поэтому сравнивать видимость пепельного света в разные дни имеет смысл лишь для одинаковых фаз. С другой стороны, высота Луны над горизонтом, по-видимому, влияет на видимость в весьма малой степени.

## 226. «Летающие блюдца» **)

В 1947 г. один американец во время полета над Скалистыми горами, обнаружил необычную группу самолетов, которые, казалось, двигались с невероятной скоростью. Он сравнил их с «летающими блюдцами». Эта история произвела большое впечатление на публику, и с тех пор каждый год появляется сотня или две сообщений о подоб-

---

*) Astr. Nachr. **196**, 269, 1913; Die Himmelswelt **34**, 95, 1924.

**) D. H. Menzel, Flying Saucers, Cambridge, 1953. Русский перевод: Мензел, Летающие тарелки, Мир, 1965.

ных объектах. Сначала эти сообщения шли из США, а затем и из Европы. Сообщается о световых пятнах, движущихся вдоль неправильных траекторий, останавливающихся, затем снова приобретающих большую скорость. Ряд наблюдений был сделан днем. Одни говорили о новой военной машине, другие — о космических кораблях, кое-кто даже беседовал с этими гостями с Марса! Изучение научно-популярной литературы показало, что подобные истории распространялись и раньше; 1882 и 1897 гг. были рекордными, но и в 1863, 1894, 1896, 1908 гг. были «летающие блюдца». Они были и в средние века, и в античную эпоху, и в библейское время.

Почти все эти наблюдения можно объяснить одной из следующих возможностей: 1. Планета Венера во время большой яркости; кажущееся движение может быть объяснено согласно § 115; 2. Яркий метеор или болид; след может сохранять светимость в течение нескольких минут и изменять форму сложным образом; 3. Маленький воздушный шар из тех, которые тысячами запускаются метеорологическими институтами по всему миру; 4. Обычный самолет при необычных условиях освещения; 5. Явления гало, особенно ложное Солнце; 6. Явления, связанные с преломлением света; 7. Облачные образования и слои тумана при необычных условиях освещения; 8. Различные случайные предметы: шары и бумажные змеи играющих детей, паутина, последовательные образы в глазе, свет прожектора, скользящий по облакам, полярные сияния и т. д.; 9. Намеренные проделки и шутки.

Следует заметить, что от астрономических учреждений не поступило ни одного такого сообщения. Не будем поэтому делать уступок страху, военному психозу или мистицизму, вспомним лучше, как много явлений, которые никогда не замечались многими людьми и которые, однако, можно весьма просто объяснить, описано в этой книге. Не следует думать, что фотографии могут служить доказательством: неожиданные и явные эффекты могут возникнуть из-за неправильного фокусирования, рассеянного света или бликов. Даже радиолокационные наблюдения не могут служить решительным доказательством.

Если вам случится увидеть «летающее блюдце», примите меры предосторожности: попросите кого-нибудь проверить ваше наблюдение; исключите наблюдения сквозь окна и занавески; оцените угловое расстояние Солнца (расстояние около 22° указывает на явление гало); заметьте точно время и отметьте все яркие источники света в окрестности.

## 227. Цвет Солнца, Луны и звезд *)

Из-за ослепительной яркости Солнца трудно судить о его цвете. Я, однако, сказал бы, что оно определенно желтое и в сочетании со светом голубого неба создает смесь, которую мы называем «белое» — цвет листа бумаги, когда светит Солнце и небо чистое. Оценки такого рода затруднительны из-за некоторой неопределенности понятия «белое». Вообще говоря, мы склонны считать преобладающий в нашем окружении цвет белым или почти белым (ср. § 109, 110).

В пасмурный или туманный день лучи, идущие от Солнца и от неба, уже перемешаны из-за бесчисленных отражений и преломлений в каплях воды; цвет неба становится белым. Если мы примем во внимание, что голубой свет неба есть в действительности рассеянный свет Солнца, мы придем к выводу, что Солнце, наблюдаемое вне атмосферы, должно также быть практически белым.

Мы уже знаем, что *оранжевый* или *красный* цвет заходящего Солнца связан с быстрым увеличением пути, который проходят его лучи в воздухе, прежде чем попадают в наш глаз; постепенно более преломляемые лучи рассеиваются почти полностью и остаются только темно-красные (§ 196).

В немногих редких случаях, когда капли тумана очень малы и особенно сильно рассеиваются короткие волны (§ 197), Солнце и высоко в небе кажется *медно-красным*. В других случаях оно *синеватое*; это, говорят, бывает чаще тогда, когда края облаков окрашены в оранжевый цвет. Возможно, здесь играет роль цветовой контраст, или неопытный наблюдатель смешивает цвет облаков в непосредственной близости Солнца с цветом солнечного диска. Совершенно другой характер имеет явление голубого Солнца, наблюдаемое сквозь плотное облако капель одинаковой величины (§ 181).

Луна днем имеет поразительно чистый белый цвет. Это объясняется тем, что рассеянный небом голубой свет добавляется к желтоватому свету самой Луны. Точно так же, когда Луна восходит или

---

*) Fournet, C. R. Paris **47**, 189, 1858; Osthoff, Mitt. Ver. Fr. d. Astr. **10**, 136, 1901; J. Plassman, Meteor. Zs. **8**, 421, 1931.

заходит днем, она практически бесцветна, тускла и лишь несколько желтовата. С заходом Солнца, по мере того как ослабевает голубой свет неба, она становится все более желтой. В какой-то момент она становится *чисто желтой*; впрочем, цвет, вероятно, кажется более насыщенным из-за психологического контраста со все еще голубым фоном. Когда сумерки близки к концу, цвет снова становится желто-белым, по-видимому, из-за того, что все вокруг становится более темным. Лунный свет кажется нам очень ярким и потому благодаря особенности нашего глаза «становится» белым, подобно всем другим очень ярким источникам света (§ 90).

Остаток ночи Луна сохраняет светлый желтоватый цвет, в точности подобный Солнцу днем. Цвет белее в очень ясные зимние ночи, когда Луна стоит очень высоко, но близ горизонта она становится такой же оранжевой и красной, как и заходящее Солнце; то, что в этом случае впечатление совершенно меняется, объясняется гораздо меньшей интенсивностью света.

Полная Луна, когда она видна в синеватой земной тени, имеет приятный бронзово-желтый цвет, без сомнения, обусловленный контрастом с окружением. Если она окружена небольшими пурпурно-красными облаками, ее цвет становится почти *зелено-желтым*; если облака оранжево-розовые, Луна превращается в *сине-зеленую*. Эти контрастные цвета отчетливее для лунного серпа, чем для полной Луны.

Не следует смешивать с цветом Луны цвет пейзажа при лунном свете, который обычно считают голубым или сине-зеленым. Без сомнения, подобный эффект в значительной мере вызывается контрастом с нашим оранжевым искусственным светом, который еще более подчеркивает голубизну неба, освещенного Луной *).

Чтобы получить предварительное представление о различиях в цвете звезд **), присмотримся к большому квадрату в созвездии Ориона. Мы заметим, что цвет Бетельгейзе, самой яркой звезды $\alpha$, слева вверху (см. рис. 72), кажется удивительно желтым или даже оранжевым по сравнению с тремя другими звездами. Близ этого созвездия мы видим другую оранжевую звезду — Альдебаран в Тельце.

Для следующего шага уже недостаточно такой легко отмечаемой разницы в цветах; здесь необходимо более тонкое различие оттенков. Это — испытание нашей способности различать цвета, в сильной степени зависящей от практики. Так как различие в цветах звезд вызывается различием их температур, мы можем заключить, что они

---

*) Hemel en Dampkring **31**, 209, 271, 1933. См. также Meteor. Mag. **67—69**, 1932—1934.

**) C. Wirtz, Astr. Handbuch, Stuttgart, 1921; Bottlinger und Schrödinger, Naturwiss. **13**, 1925.

показывают ту же последовательность цветов, что и светящееся тело, постепенно остывающее: от *белого* через *желтый* и *оранжевый* к *красному*. Окончательно не установлено, следует ли считать наиболее горячие звезды голубыми или белыми; мнения различных наблюдателей относительно того, что в действительности представляют собой «белые» звезды, расходятся. По-видимому, на некоторых наблюдателей сильнее, чем на других, влияет слабо освещенный фон неба, который кажется нам голубоватым и который мы привыкли считать бесцветным просто потому, что это обычный цвет ночного пейзажа.

Приводимая ниже шкала дает представление о цветах звезд и числах, которыми эти цвета характеризуются. Независимые оценки цвета опытными наблюдателями часто бывают на класс выше или ниже приведенного среднего. Оценки в приведенных здесь примерах были сделаны наблюдателями, которые не видели голубых звезд как таковых, и поэтому не приводили отрицательных значений.

Шкала цветов

| | | | |
|---|---|---|---|
| —2 | голубой | 4 | чисто желтый |
| —1 | голубовато-белый | 5 | глубокий желтый |
| 0 | белый | 6 | оранжево-желтый |
| 1 | желтовато-белый | 7 | оранжевый |
| 2 | бело-желтый | 8 | желтовато-красный |
| 3 | светло-желтый | 9 | красный |

Примеры

| | | | |
|---|---|---|---|
| α Большого Пса (Сириус) | 0,8 | β Малой Медведицы | 5,8 |
| α Лиры (Вега) | 0,8 | α Волопаса (Арктур) | 4,5 |
| α Льва (Регул) | 2,1 | α Скорпиона (Антарес) | 7,5 |
| α Малого Пса (Процион) | 2,4 | Венера | 3,5 |
| α Орла (Альтаир) | 2,6 | Марс | 7,6 |
| α Большой Медведицы | 4,9 | Юпитер | 3,6 |
| β Большой Медведицы | 2,3 | Сатурн | 4,8 |
| α Малой Медведицы | 3,8 | | |

Звезды также становятся тем краснее, чем ближе они к горизонту, однако здесь их мерцание препятствует правильной оценке цвета. Замечательно, что в земных условиях мы считаем раскаленное до 2500° Ц тело белым, в то время как звезда такой температуры кажется нам оранжево-красной. Возможно, что это психологическое явление следует приписать тому, что звезды гораздо менее ярки, так что красная компонента еще ощущается глазом, в то время как зеленая и синяя компоненты лежат за пороговым значением.

Один хороший наблюдатель сообщил мне, что он лучше определяет цвета звезд при свете Луны, чем темной ночью. Возможно ли, чтобы колбочки нашего глаза при рассеянном освещении играли бóльшую роль, чем палочки?

## 228. Цвет облаков

Большое удовольствие — следить летом за проплывающими мимо кучевыми облаками и пытаться объяснить, почему они то светлые, то темные. Когда облако освещено Солнцем, оно ослепительно белое, но когда облако проходит над нами, его основание становится серым или совсем темным. Капли воды в облаке так тесно расположены друг к другу, что оно представляет собой почти совершенно непрозрачное белое тело — белое потому, что свет с трудом проникает в облако, но очень хорошо отражается многочисленными каплями. Если Солнце закрыто кучевыми облаками, они кажутся темными, но края облаков всегда светлые: «каждое облако имеет серебряную подкладку». Таким образом, распределение света и тени дает нам интересные данные о различных частях облака — верхних, нижних, передних, задних — и о действительной форме этого громадного образования. Не всегда легко получить правильное представление о его пропорциях, а также о положении облака по отношению к Солнцу. Если, например, облака располагаются передо мной, а Солнце на некотором расстоянии над ним, я буду озадачен, увидев лишь одни тени (рис. 169, *а*). Я не могу представить себе грандиозность

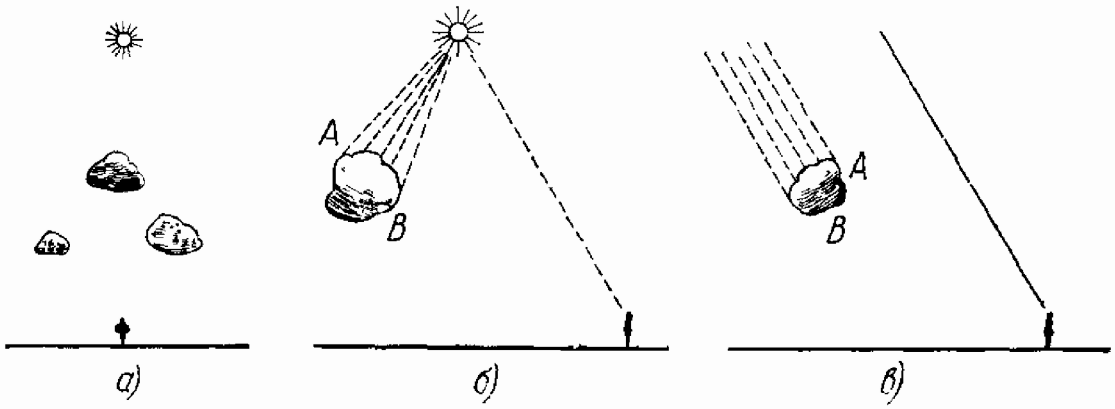



Рис. 169. Свет и тени на кучевых облаках: *а*) как мы видим пейзаж и наблюдателя, если смотреть с севера на юг; *б*) ошибочные личные впечатления наблюдателя и картина, которую он ожидает увидеть; *в*) как обстонт дело в действительности. В случаях *б* и *в* наблюдатель смотрит с востока на запад. Солнце на юге

расстояния до Солнца, бессознательно считаю его весьма близким и потому мне кажется, что часть $AB$ должна быть освещена (рис. 169, *б*). На самом же деле солнечные лучи, освещающие облако, идут параллельно линии, соединяющей Солнце с моим глазом (рис. 169, *в*).

Как бы капризна ни была игра света и тени, как бы ни усложняли дело тени, отбрасываемые одним облаком на другое, кажется невозможным объяснить только этим все различия в цветах кучевых облаков.

Когда небо проясняется после бури и на нем остается лишь несколько кучевых облаков, ярко освещенных Солнцем и расположенных так, что тень от одного из них никак не может упасть на другое, эти облака становятся все темнее и темнее и, наконец, перед тем как совсем исчезнуть, превращаются в сине-черные. Общее впечатление таково, что тонкие части кучевых облаков, видимые на фоне синего неба, оказываются не «синее+белое» (как можно было бы ожидать), но «синее+черное»*).

С другой стороны, кучевое облако кажется серым, когда мы видим его на фоне другого большого облака, совершенно белого, так что не может возникнуть вопрос об увеличении яркости просто из-за роста общей толщины слоев. Физика этих явлений, хотя и наблюдаемых ежедневно, все еще недостаточно изучена. Конечно, следует очень осторожно отнестись к мысли о том, что облака действительно поглощают свет; сначала нужно попытаться объяснить явление, предполагая, что облака представляют собой твердые белые образования, затем вспомнить, что в действительности это не что иное, как рассеивающий свет туман, и, наконец, принять во внимание, что облака могут содержать темные пылевые частицы.

Интересно сравнивать облака с белым паром (не дымом!) паровоза. В некоторых случаях пар кажется белее, если наблюдать под большим углом к падающему свету, и менее ярким — при наблюдении со стороны Солнца, когда глаз воспринимает лучи, отраженные почти в направлении падения. В других случаях, независимо от направления наблюдения, пар гораздо ярче самых ярких частей кучевых облаков; может быть, это связано с большим расстоянием до облаков и ослаблением света из-за рассеяния в воздухе.

Темные кучевые облака на большом расстоянии часто кажутся синеватыми. Это не цвет самих облаков, а свет, рассеянный в атмосфере между облаком и нашим глазом. Чем дальше такое темное облако, тем больше его цвет приближается к цвету неба. С другой стороны, яркие облака близ горизонта становятся желтоватыми (§ 196).

Следовало бы также рассмотреть и другие облака и попытаться объяснить, например, почему дождевые облака такие серые, почему у грозовых облаков особенный свинцовый цвет виден рядом с блекло-оранжевым. Не пыль ли это? Наши сведения обо всем этом, однако, так неполны, что мы ограничимся призывом к читателю вести самостоятельные наблюдения.

Распределение яркости по небесному своду, когда он сплошь и равномерно затянут облаками, очень характерно и как бы дополняет распределение при ясном небе. Сравните, например, при помощи зеркальца зенит и горизонт: при ясном небе зенит всегда темнее; отношение яркостей колеблется от 3 до 5 (фотографии XIX и XX).

---

*) C. R. Paris **177**, 515, 1923.

## 229. Цвет облаков на восходе и на закате Солнца

Описывая закат, мы раньше не обращали внимания на облака. Теперь мы рассмотрим это исключительно красивое зрелище с его бесконечным богатством цветов, разнообразием форм и кажущимся отсутствием порядка. Мы хотим сосредоточить свое внимание на том, что видно перед заходом Солнца; «настоящие» же сумеречные явления были рассмотрены в § 210. Великолепие облаков исчезает вместе с заходом Солнца!

Незадолго до захода облака освещаются:

1. Прямым солнечным светом, который последовательно становится желтым, оранжевым, красным — в зависимости от высоты Солнца.

2. Светом неба, оранжево-красным в направлении Солнца, голубым в других направлениях. Этот оранжево-красный свет следует приписать сильному рассеянию на больших частицах пыли и водяных каплях, которое вызывает лишь небольшое отклонение лучей; голубой свет объясняется рассеянием «назад» на молекулах воздуха.

Вообразим теперь облако около Солнца, сначала очень тонкое, плотность которого постепенно растет. Его капли рассеивают свет под малыми углами, так что тонкая облачная вуаль направляет к нам довольно много света от Солнца, когда оно располагается недалеко от прямой, соединяющей нас с облаком. Чем больше число рассеивающих частиц, тем сильнее теплый оранжево-розовый свет. Однако свет усиливается лишь до тех пор, пока рассеивающий слой не становится настолько плотным или настолько толстым, что свет уже не проходит сквозь него почти беспрепятственно. Тяжелые облака практически не пропускают света и лишь отражают к нам свет той голубой части неба, которая освещает их с нашей стороны (рис. 170). Это показывает, что самые красивые закаты следует ожидать, когда облака тонки или когда небо покрыто облаками лишь местами.

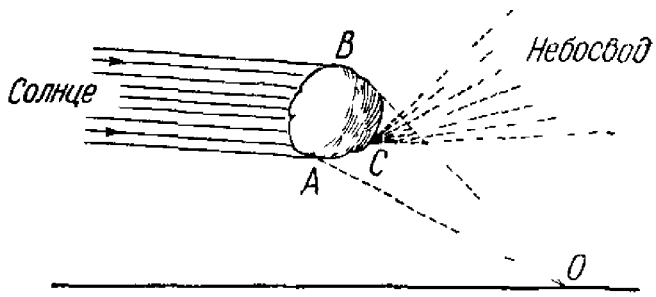



Рис. 170. Освещение облака перед заходом Солнца.

На западе, где заходит Солнце, мы видим освещенные сзади тонкие облака и освещенные спереди более толстые или более плотные облака — яркие оранжево-красные в первом и более темные, серо-голубые — во втором случае. Этот контраст в цветах, который часто связан с различием в форме и структуре, восхитителен.

Края тяжелых серо-голубых облаков часто имеют чудесный золотистый цвет. Заметим, что край $A$ (рис. 170), кажущийся ближайшим к Солнцу, светится сильнее, чем край $B$, поскольку 1) угол отклонения световых лучей здесь меньше, 2) если мы вообразим, что

облако совершенно круглое, то со стороны, ближайшей к Солнцу, должна быть видна узкая полоска, непосредственно освещенная Солнцем.

На краях облаков, располагающихся от Солнца значительно дальше, это прекрасное рассеяние уже не видно; с одной стороны они освещены прямыми лучами Солнца, с другой — голубым светом неба, так что и в этом случае возникает игра оранжевого и голубого. Когда Солнце опускается ниже, цвета становятся более теплыми до тех пор, пока с противоположной стороны, на востоке, на облаках не появляется пурпур восточной зари.

После захода Солнца его свет постепенно исчезает с неба; дольше всего остаются освещенными высокие облака. Это приводит к еще одному *великолепному контрасту: позади — облака*, еще освещенные Солнцем, перед ними — облака, освещенные только светом неба.

Кажущееся прояснение неба в сумерках часто является только оптическим эффектом *). Если облака не освещаются больше Солнцем, а лишь рассеянным светом неба, контраст между облаком и фоном неба значительно уменьшается, а при слабом освещении становится вообще почти неразличимым.

## 230. Освещение облаков земными источниками света **)

Прогуливаясь вечером по открытой местности, когда небо сплошь затянуто облаками, мы замечаем кое-где вдали низко на небе слабое сияние. Это сияние вызывается светом городов или больших селений. По направлению, в котором мы видим сияние, можно определить, какому городу оно принадлежит. Оценим в радианах угловую высоту $\alpha$ сияния над горизонтом и определим по карте расстояние $A$ до города или селения; тогда высота облаков равна $h=\alpha A$. Например, из Бильтховена я наблюдал сияние над Утрехтом на высоте $\alpha=8°,5$, откуда $h=790$ *м*, над Зейстом $\alpha=6°$, откуда $h=780$ *м*. В 1884 г. сияние над Лондоном можно было видеть с расстояния около 60 *км* ***). С какого расстояния оно видно сейчас?

Более тщательное изучение этого зарева над большими городами вознаградит ваши усилия. Вы очень скоро заметите, что оно меняется ото дня ко дню; его изменчивость почти столь же велика, как у полярных сияний. Вы откроете два компонента этого явления: 1) легкую световую дымку, вызванную освещением воздуха с его частицами пыли и влагой, которое сильнее всего близ горизонта; 2) световое

---

*) Atkins, Nature **155**, 110, 1945.

**) La Cour, Overs. Danks Vidensk. Selsk. Forh., 75, 1871. См. также Bravais, Pogg. Ann. **77**, 156, 1849.

***) Nature **29**, 104, 1884.

пятно на облачном слое, очертания которого представляют собой почти точный отпечаток очертаний города (который имеет форму более или менее близкую к круговой), но с большого расстояния пятно кажется эллипсом с очень резкими краями, особенно если слой облаков ровный.

Если небо светлое и безоблачное, или, наоборот, очень туманно, сияния над городом не видно. При легкой дымке развивается световой туман, не очень хорошо различимый. Если небо покрыто слоем облаков, мы ясно видим световое пятно. Возможны любые сочетания. Иногда видны тени от отдельных низко расположенных облаков или неправильные световые пятна, отделяющиеся от главной массы света. Высоту облаков можно определить, измеряя световое пятно; более точные результаты получаются из высоты его границ. В руках опытного наблюдателя этот метод настолько точен, что позволяет судить, следует ли облачный слой неровностям земной поверхности.

Лакур пытался проводить такие наблюдения и днем. Однажды после снегопада он наблюдал, что облачный слой был темнее над морем, чем над покрытой снегом сушей. Линия раздела стала неожиданно резкой, когда он отъехал так далеко, что ее высота не превышала 20° над горизонтом. Впоследствии он нашел, что над лесами на облаках также заметны темные области; даже над Копенгагеном, когда растает снег на крышах, видна темная область подобного рода. По всем таким световым переходам можно определить высоту облачного слоя, и результаты будут согласовываться друг с другом.

Легче всего наблюдать различие между покрытой снегом сушей и морем; значит, лучше всего с этого и начинать. Это не что иное, как знаменитые «ледяные отблески» и «водяное небо» полярных исследователей, которые предупреждают о приближении пакового льда.

> И вечером я увидел замечательное сияние, охватывающее северную часть неба, более сильное у горизонта, хотя его можно было проследить по всему небесному своду вплоть до зенита. Чудесный сказочный полусвет, подобный отблеску далекого гигантского пожара, ибо здесь, в стране призраков, свет был призрачно бел.
>
> (Ф р. Н а н с е н, Bøken om Norge, Kristiana, 1914).

Не так хорошо известно, что песок египетских пустынь также бросает на облака отблеск, хорошо различимый с некоторого расстояния. Над мелководьем Индийского океана, где море имело особенно ярко выраженный зеленый цвет, оно отбросило светло-зеленый отблеск на облака, достигающие высоты 300—400 *м*. И даже над вересковыми пустошами, когда вереск в цвету и залит солнечным светом, рыхлые медленно плывущие облака иногда окрашиваются снизу в приятный пурпур.

Однажды световое пятно наблюдалось на однородном облачном слое; было доказано, что это было отражение солнечного света в далеком маленьком озере. Ветра не было, и Солнце было низко над горизонтом.

### 231. Причины, определяющие цвет воды *)

Бесконечно изменчивые, быстро изменяющиеся рисунки, напоминающие мрамор, разные для каждой ряби, прелесть их сочетаний всегда доставляет удовольствие глазу...

Попытаемся проанализировать их.

1. Часть света, приходящего к нам из воды, отражается от ее поверхности; пока поверхность спокойна, она действует подобно зеркалу, и цвет воды голубой, серый или зеленый, в соответствии с ясным или облачным небом или пологими берегами, покрытыми травой. Но если поверхность воды покрыта рябью, цвета неба и берегов перемешиваются и отблески одного цвета накладываются на другой. Когда поверхность сильно взволнована, волна просто отражает смесь цветов.

> То, что мы обычно считаем поверхностью одного цвета, есть в действительности результат бесконечно меняющихся оттенков, часто растягивающихся столбами на большие расстояния, и даже наше впечатление о самой поверхности немало зависит от этих многочисленных оттенков, непрерывное движение которых мешает их анализу или пониманию их причин.
>
> (Р е с к и н, Современные художники)

2. Другая часть света проникает в воду и рассеивается там частицами пыли. Эти частицы, как правило, бывают столь велики, что рассеивают все лучи одинаково, так что испускаемый свет имеет тот же цвет, что и падающий; если присутствуют частицы песка или глины, испускаемый свет может иметь коричневый оттенок. В очень глубокой чистой воде значительная часть света рассеивается самими молекулами воды, и потому имеет тот же приятный голубой цвет, как и небо или толстый кусок ледникового льда.

3. В мелкой воде часть света достигает дна и испытывает там диффузное отражение, приобретая в то же время цвет дна водоема.

4. На своем пути сквозь воду лучи света претерпевают непрерывные изменения: а) из-за *рассеяния* они теряют часть своей интенсивности; в чистой воде особенно ослабляются фиолетовые и синие лучи

---

*) B a n c r o f t, Journ. Franklin Inst. **187**, № 3, 1919; M. P o l l o c k, Light and Water London, 1903; v. A u f s e s s, Ann. d. Phys. **13**, 678, 1904; C. V. R a m a n, Proc. Roy. Soc. **101**, 64, 1922; Ш у л е й к и н, Phys. Rev. **22**, 85, 1923; H u l b e r t, J. Optic. Soc. Amer. **35**, 698, 1945.

(§ 189); б) из-за *поглощения* в воде, которое становится заметным уже в слоях глубиной в несколько метров, теряются желтые, оранжевые и красные лучи точно так же, как при прохождении света сквозь окрашенное стекло.

Рассеяние присутствует неизменно даже в самой чистой воде, поскольку молекулы в воде распределены неравномерно, и это обусловливает неоднородность и некоторую «зернистость»; кроме того, каждая молекула не имеет правильной сферической формы. Это рассеяние во всех отношениях можно сравнить с рассеянием в воздухе; оно также меняется пропорционально $\frac{1}{\lambda^4}$ и, следовательно, больше для синих и фиолетовых лучей. В менее чистой воде присутствуют взвешенные частицы. Если они очень малы, их действие складывается с действием молекул и вызывает синефиолетовое рассеяние. Если они больше, чем примерно 0,001 *мм*, они рассеивают все цвета одинаково и в основном «вперед» (§ 189).

Обычная мыльная вода — хороший пример жидкости, содержащей мельчайшие рассеивающие частицы. Освещенная спереди, она на темном фоне кажется синеватой, а в проходящем свете оранжевой (ср. § 188).

Поглощение в воде рек и озер следует приписать главным образом присутствию химических соединений железа (ион $Fe^{+++}$) и гуминовых кислот. При концентрации железа 1 часть на 20 миллионов частей воды и органических гуминовых кислот 1 часть на 10 миллионов (как и бывает в действительности) вода должна была бы показывать более сильные цвета, чем это наблюдается в природе. По-видимому, соединения $Fe^{+++}$ окисляют под действием света гуминовые кислоты, превращаясь в соединения $Fe^{++}$. Последние снова соединяются с кислородом, снова становясь соединениями $Fe^{+++}$, и т. д.

Приведем теперь несколько примеров, показывающих, как сочетание различных факторов создает цвет воды.

## 232. Цвет придорожных луж

Простой случай — это лужи на дороге после дождя. Если угол, под которым мы смотрим на лужу, велик, отражение кажется почти правильным и отраженные объекты контрастными: черные ветви действительно черны. Если мы будем смотреть все более и более наклонно, отражение будет становиться все слабее (§ 60), нам покажется, что оно подернуто дымкой. Цвета будут блекнуть и, что удивительнее всего, темные части будут уже не темными, а серыми. Дымка создается светом, падающим на лужу со всех сторон, проникающим в воду и рассеивающимся во всех направлениях. Если вода мутная, рассеяние вызывается взвешенными частицами пыли; если вода окрашена, например, в синий цвет, рассеянный свет ста-

новится синеватым, и этот цвет примешивается к отражению. Если вода чистая, а дно светлое, как в лужах морской воды на песчаном пляже, все отраженные изображения приобретают песочный оттенок; когда смотришь почти перпендикулярно, видно дно и отражение только самых ярких предметов. Однако при чистой воде и темном дне отражение сохраняется ясным и контрастным, хотя и менее ярким, даже при почти перпендикулярном направлении взгляда. В темной спокойной луже отражение листвы деревьев кажется иногда более красочным и четким, чем сама листва! Этот психологический эффект объясняется главным образом меньшим слепящим действием окружающего фона.

Попросите, чтобы кто-нибудь помог вам, останавливаясь на разных расстояниях от лужи, и проследите, как меняется его отражение. Этот опыт особенно удается, если проделать его на морском берегу.

На этих «малых» примерах мы показали здесь причину того, почему предметы, находящиеся ниже уровня моря (скалы, подводные лодки и т. д.), легче увидеть с самолета, чем с корабля.

> Едва ли пейзаж в придорожном пруде или луже менее богат, чем над ними. Это не есть, как мы ждем, нечто коричневое, мутное, темное; там столько же души, сколько в нас самих, и мы найдем на их дне и сучья высоких деревьев, и листья шелестящей травы, и богатство изменчивых оттенков неба.
>
> (Р е с к и н, Современные художники)

## 233. Цвет рек и каналов (фотография XXII)

Рябь на поверхности вызывает вечно меняющееся многообразие цветов любого канала или канавы (§ 17—26). Чтобы установить, покрыт ли рябью какой-то определенный участок поверхности, мы должны посмотреть на него с различных направлений. Легкая рябь становится видимой лишь вдоль границы между ярким и темным отражением; в отражении всюду одинакового голубого неба рябь увидеть нельзя, разве лишь у отражения темного леса. Крупная рябь приносит штрихи света и тени даже в середину отражений больших однообразных областей — то ли потому, что она сильно отклоняет лучи, то ли потому, что коэффициент отражения на передней и задней поверхностях волны становится различным (см. рис. 173, стр. 312).

Наблюдения показывают, что граница между покрытой рябью и спокойной поверхностью воды почти всегда обрисовывается с удивительной четкостью. Это не следует приписывать распределению потоков ветра: когда идет дождь и вся поверхность воды вовлечена в одинаковые колебания, граница раздела по-прежнему видна совершенно четко. Действительная причина кроется в чрезвычайно

тонкой пленке масла, не достигающей даже миллионной доли миллиметра (2 молекулы масла!); такого слоя совершенно достаточно, чтобы погасить рябь от ветра или дождя. Эта пленка образуется из остатков животных и растительных веществ, отработанного масла судов и остатков сточных вод. Ветер сдувает этот масляный слой и подгоняет его к одной стороне канала. Вы всегда замечаете, что вода покрыта рябью с той стороны, откуда дует ветер, и спокойна у противоположного берега. В этой спокойной воде плавают прутья и листья, лишь еле-еле смещающиеся друг относительно друга — их удерживает на месте тончайшая плешка масла! Этим и объясняется разительное различие между живой искрящейся поверхностью воды лесного ручья и свинцовой, как бы вязкой водой водоемов бедных районов большого города.

Продолжим наблюдения световых явлений на поверхности воды, изучая, как отражение постоянно соперничает со светом, приходящим из глубины. Мы стоим под деревьями у края воды. Тут и там мы видим отражения верхушек деревьев и между ними яркие пятна голубого неба. В местах, где отражается ясное небо, мы не видим дна, так как свет из глубины относительно слаб. В местах, где отражаются темные деревья, мы видим темную смесь цветов, образующуюся из цвета листвы, цвета дна водоема и диффузного света, рассеянного частицами пыли в воде.

Отражение темного киля лодки имеет зеленоватый цвет самой воды, в то время как яркая белая полоса вдоль лодки остается просто белой.

Убедитесь, что вы можете видеть дно только близ берега. Если смотреть на воду на некотором расстоянии, уже не удается увидеть дно, даже если там и не глубже. Дело в том, что при большом угле падения отраженный свет становится сильнее и преобладает над светом из глубины.

Чем выше Солнце, тем меньше света отражается на поверхности, но тем больше он проникает в глубь воды. В результате возрастает количество света, рассеянного в глубине. В яркий солнечный день, когда Солнце стоит высоко в небе, нам часто бросается в глаза, что пруд как бы освещен изнутри.

Существует несколько простых методов исключить отражение на поверхности:

1. Можно держать над головой черный зонтик.

2. Можно наблюдать, стоя под мостом. В солнечную погоду вы увидите, как из воды исходит рассеянный свет прекрасного желто-зеленого цвета. Морщинки ряби можно теперь наблюдать лишь благодаря преломлению света. Нам кажется при этом, что предметы под водой слегка покачиваются, а вода становится похожей на желе.

3. Держите под водой маленькое зеркальце (рис. 171), наклоняя его под разными углами так, чтобы можно было судить о цвете света,

проникающего в воду сверху, после того как он прошел в воде определенное расстояние. Если этот опыт проделать в воде обычной канавы, вы сможете наблюдать желтый цвет лучей, обусловленный истинным поглощением. В неглубокой воде для той же цели может служить черепок белого фарфора на дне канавы или листок белой

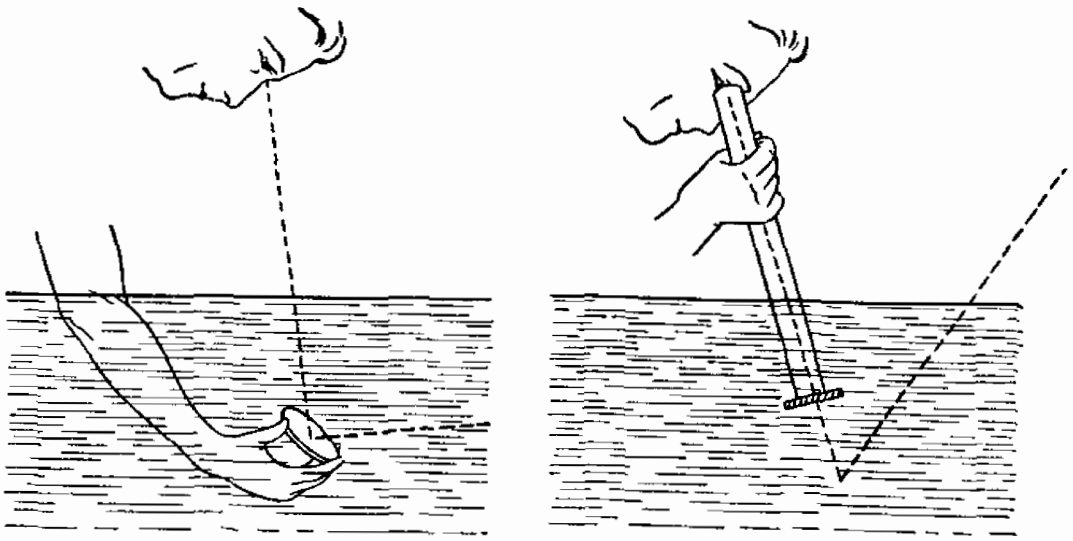


Рис. 171. Наблюдение цвета воды, освобожденного от влияния поверхностного отражения.

бумаги под водой. На море пользуются белым диском, который опускают на определенную глубину, но это уже нельзя считать действительно простым опытом.

4. Используйте *водяной телескоп* — это просто тонкая трубка, если возможно, со стеклянной пластинкой на одном конце (рис. 171). С его помощью можно судить о цвете света, приходящего снизу вследствие рассеяния на дне или на взвешенных частицах пыли *). Используйте ваш водяной телескоп во время купанья! На кораблях старой постройки бывают вертикальные отверстия уборных, уходящие в воду: это настоящий водяной телескоп большого масштаба!

5. Смотрите сквозь николь, поворачивая его так, чтобы исключить отраженный свет (§ 238).

## 234. Цвет моря

Цвет моря определяется главным образом отражением от его поверхности. Но поверхность моря живет, движется, волнуется, покрывается зыбью в зависимости от ветра и формы берегов — и отражение возникает бесчисленным множеством способов.

Главное правило: далекие отражения смещены к горизонту из-за того, что мы видим склоны далеких волн (§ 20). Поэтому цвет моря вдали приблизительно такой же, как неба на высоте 20—30°, и,

*) Wittstein, Ann. d. Phys. 45, 474, 1858.

следовательно, темнее, чем небо на горизонте (§ 195); это тем более верно потому, что отражается лишь часть света.

Кроме того, море имеет «свой собственный» цвет: цвет света, рассеянного в его глубине. С точки зрения оптики, важнейшее, что характеризует море,— это глубина. Глубина морей так велика, что свет, достигший его дна, практически не возвращается обратно. Поэтому «собственный цвет моря» определяется совместным действием рассеяния и поглощения масс воды. Море, в котором свет лишь рассеивается, должно (если не говорить об отражении) казаться молочно-белым, поскольку весь свет, проникающий в море, в конце концов выйдет обратно. Море, в котором происходит лишь поглощение, должно быть черным, как чернила; в таком море лучи света будут выходить наружу лишь после того, как они достигли дна, и даже очень малого поглощения на этом очень длинном пути сквозь воду достаточно, чтобы погасить их.

Однако, как уже говорилось, цвет определяется совместным действием поглощения и рассеяния: лучи, которые слабо подвергаются рассеиванию, проникнут в воду дальше, прежде чем они будут рассеяны «назад», и в течение этого длинного путешествия они испытают более сильное ослабление из-за поглощения.

Вообще говоря, можно считать, что количество света, возвращающегося из глубины, увеличивается с ростом отношения

$$\frac{\text{коэффициент рассеяния}}{\text{коэффициент поглощения}}.$$

Полная теория, однако, отнюдь не так проста.

Можно объяснить простым опытом, как возникает цвет моря. Наполните банку из черного папье-маше прозрачной жидкостью голубоватого цвета. Это будет изображать море, такое глубокое, что мы не видим его дна. В этом случае море кажется непроницаемо черным. Влейте теперь в банку мутную жидкость, например, разбавленное молоко. Вы сразу же заметите светло-голубой цвет жидкости. Этот опыт можно проделать и с голубым стеклом, поочередно кладя его на черную и белую бумагу.

Прямое влияние морского дна на цвет воды в наших морях не удается наблюдать уже при глубинах больше одного метра. Рескин, однако, утверждает, что даже на глубинах 100 *м* дно сильно влияет на цвет моря; подобные же утверждения можно слышать от моряков. В действительности местные возвышения морского дна меняют форму волн и ряби над ними; в то же время, естественно, здесь по сравнению с более глубокими местами в воде больше твердых частиц, увеличивающих рассеяние. Таким образом, морское дно действительно оказывает некоторое влияние на цвет воды, однако не непосредственно.

На берегу, где море имеет прекрасный зеленый цвет, часто можно видеть, как темные скалы и морские водоросли как бы светятся под

водой удивительным пурпурным светом. Это не что иное, как проявление одновременного цветового контраста. Глаз особенно чувствителен к нему благодаря прозрачной пелене, которой рассеивающая свет вода покрывает все предметы.

Недавно в Ла-Манше было проведено изучение взвешенных частиц, рассеивающих свет *). Их число увеличивается с глубиной; в каждом кубическом метре в верхних слоях содержится всего 0,3 $см^3$ микроскопических организмов и приблизительно такое же количество минеральных частиц, в частности глинистых, кусочков дерева, осколков раковин, зерен сажи. Частицы меньше 0,1 *мк* практически отсутствуют. Частицы были даже сосчитаны под ультрамикроскопом.

## 235. Свет и цвет на Северном море

Описанные ниже наблюдения были сделаны во время каникул в Голландии на плоском песчаном побережье, которое тянется практически точно с севера на юг. Здесь можно было видеть великолепные закаты над морем. Явления, естественно, по-разному распределились в течение дня для различно ориентированных участков берега; существенно также положение Солнца относительно поверхности моря.

### 1. Безветренно; голубое небо

Тихим ранним утром море гладко как зеркало. Совершенно чистое небо подернуто дымкой. Крошечные водовороты у наших ног, у границы воды, оставляют узкую полоску пены, то исчезающую, то появляющуюся снова. Царит тишина...

Поднимемся на дюну. Поверхность моря простирается перед нами подобно карте. Одни участки ее настолько гладки, что точно отражают серо-голубое небо, другие — также серо-голубого цвета — кажутся темнее. Границы участков видны так ясно, а сами участки настолько рельефны, что трудно удержаться и не зарисовать их. Но через сравнительно короткое время все участки совершенно изменяют свое положение. Поэтому более светлые места не могут быть «песчаными отмелями», как их обычно называют туристы; их происхождение объясняется невидимой, чрезвычайно тонкой масляной пленкой на поверхности моря (подобной той, о которой шла речь в § 233), достаточной, чтобы погасить рябь на воде. Эту масляную пленку оставляют, по-видимому, за собой суда; возможно, она возникает из их отработанного горючего. Там, где этой пленки нет, вода покрыта легкой рябью. Она станет заметна позже, когда Солнце,

*) Atkins, Jenkins, Warren, J. Marine Biol. Ass. V. K. **33**, 497, 1954; Atkins and Poole, Proc. Roy. Soc. Dublin **26**, 313, 1954; Bull. Amer. Meteor. Soc. **28**, 125, 1947.

поднявшись выше, заставит рябь сверкать и искриться. Сейчас цвет этих частей более темный, во-первых, потому, что передний склон каждой «рябинки» отражает более высокую, а следовательно, и более темную часть неба, и, во-вторых, потому, что путь лучей здесь менее «скользящий» и они слабее отражаются. Сквозь николь или поляроид (если плоскость колебаний вертикальна) темные участки кажутся гораздо более темными и различие между ними и более светлыми участками становится сильнее. Тот факт, что границы различных участков кажутся всюду параллельными берегу, объясняется перспективным сокращением — в действительности области, покрытые масляной пленкой, могут иметь любую форму (рис. 172).

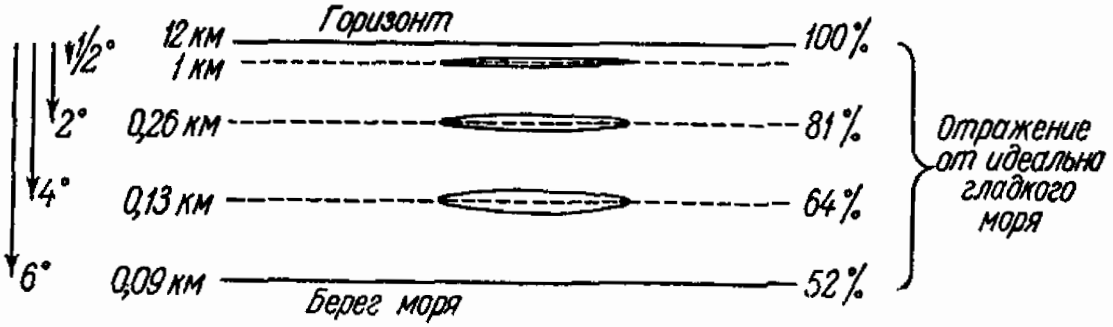



Рис. 172. Как мы видим море с десятиметровой дюны. Эллипсы показывают, как вследствие перспективы изменяются круги в различных точках поверхности моря.

Немногие настоящие песчаные отмели можно угадать по более желтому цвету, но лишь там, где глубина очень мала — от 10 до 20 *см*.

Купаясь в полдень, мы удивляемся необычной прозрачности воды спокойного моря. До глубины 1 *м* мы ясно видим все подробности на дне и даже мелкие плавающие существа. В воде нет песчаных частиц, разве немного там, где разбивается зыбь, поднимая крошечные облачка песка. Если посмотреть сверху вниз на воду, то отражение неба будет сильно ослаблено и желтый цвет песчаного дна окажется преобладающим вплоть до глубины 20 *см*. На глубине от 1 до 1½ *м* цвет превращается в приятный зеленый, но здесь мы уже должны создать из рук некоторое подобие водяного телескопа, чтобы устранить отражение неба (§ 233). Этот зеленый цвет принадлежит свету, проникшему в воду и рассеянному назад. Однако, как только мы взглянем на поверхность моря несколько дальше, отражение берет верх, и мы повсюду видим отраженное голубое небо. Чудесное сочетание зелени моря и синевы неба!

Вечером на высоте нескольких градусов над горизонтом Солнце скрывается за грядой сине-серых облаков. Над ними простирается оранжево-золотая заря, а еще выше она постепенно переходит в темную синеву вечера. Море, еще по-прежнему спокойное, отражает без искажений всю картину. Но если посмотреть на запад, мы различим мелкую зыбь (§ 21), и в дальней части моря, где отражается темная гряда облаков, каждая волна зыби образует маленькую оран-

жево-желтую черточку (наклонная волна отражает более высокую часть неба). Ближе к нам, где море оранжево-желтое, волны, отражая более высокую (и более темную) часть неба, создают темную штриховку. На северо-западе и на юго-западе, где вечерняя заря не видна и наш взгляд не перпендикулярен к склонам волн, море по-прежнему отражает однородную гряду облаков, не изменяя их цвета и яркости. Линия горизонта здесь исчезает, море и небо сливаются воедино, и плывущие вдали корабли кажутся скользящими в серо-голубой бесконечности.

Несколькими днями позже, когда снова устанавливается хорошая погода и слабеет ветер, вечером можно видеть части моря, покрытые тонкой маслянистой пленкой, отражающими сине-серую гряду облаков, в то время как части моря, покрытые зыбью, отражают, из-за смещения изображения, оранжево-желтое небо.

## 2. Легкий ветер, ясное голубое небо, несколько отдельных облаков

Утром, прежде, чем я поднимаюсь на вершину дюны, меня удивляет резкий контраст между иссиня-черным морем и светлым у горизонта небом. Видимость превосходна, горизонт и далекие предметы вырисовываются необыкновенно отчетливо — это продолжается в течение всего дня. Дует мягкий западный ветер; вдоль берега двумя

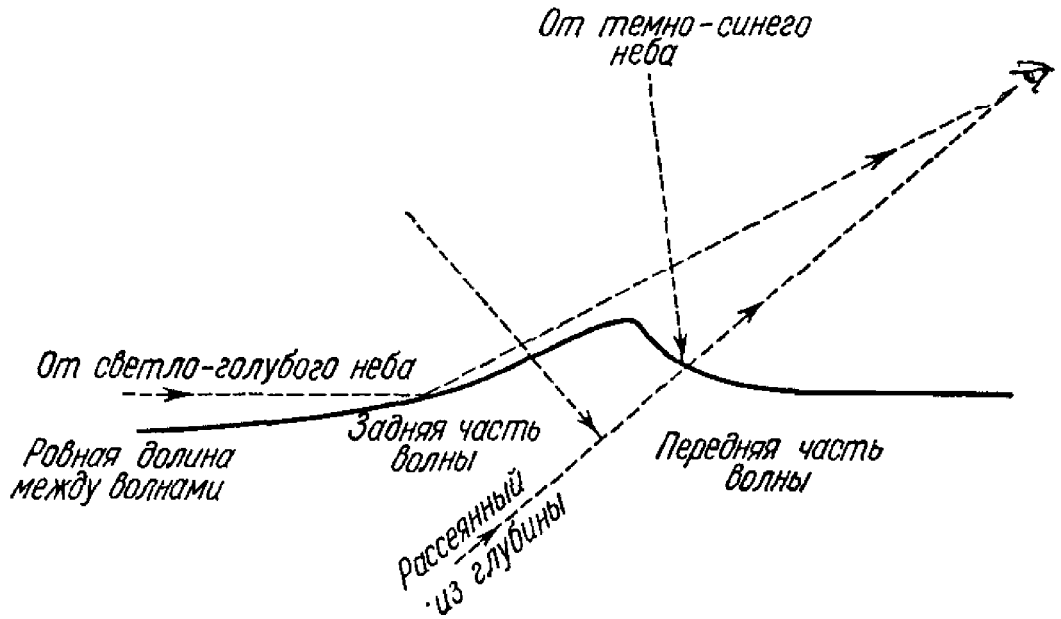



Рис 173. Как в морской волне возникают различные цвета.

или тремя линиями пены тянутся буруны; в открытом море пены не видно. Мы занимаем наш наблюдательный пост на дюне.

Проследим за отдельными бурунами (рис. 173). Спереди они темно-серого цвета с желтовато-зеленым оттенком: наш взгляд встречает передний склон волны почти под прямым углом, следовательно, к

нам попадает очень мало отраженного света и к тому же от темных частей неба. Мы видим, однако, желто-зеленый свет, который или рассеивается назад в глубине моря или проникает через «спину» волны и выходит спереди, но этот свет очень слаб, и нам передний склон волны кажется темным. С другой стороны «спины» волн отражают светлое голубое небо у горизонта. Таким образом, волны показывают очаровательный контраст темного желто-зеленого переднего склона и светлой голубой «спины». Между бурунами задние склоны развиваются в плоские, покрытые легкой зыбью и хорошо отражающие долины, которые также кажутся голубыми. Несколько отмелей вдоль берега легко различаются по характерному разбиванию волн, между отмелями море спокойнее и глаже. Дальше от берега штриховка от волн становится все более тонкой. Здесь уже нет бурунов, но контраст между передним и задним склонами сохраняется. Если смотреть еще более вдоль поверхности воды, мы уже не увидим долин между волнами и, наконец, исчезнут и темные склоны. Видны будут гораздо менее крутые участки волн, отражающие, главным образом, небо на высоте около 25°. Это «смещение отраженных изображений» (§ 20) и ответственно за темный синий цвет моря и за контраст между морем и небом у горизонта. Контраст сегодня так силен потому, что у самого горизонта небо очень светлое, а уже на очень малой высоте приобретает глубокий синий цвет. Проверьте это, проектируя отражение более высокой части неба при помощи маленького зеркала в соседстве с горизонтом; вы будете удивлены! Отметьте в то же время, что на расстоянии море заметно темнее, чем наиболее темные части неба. Коэффициент отражения поверхности моря значительно ниже 100%. Контраст между морем и небом сильнее на западе и становится меньше на севере и на юге. Это объясняется тем, что бóльшая часть волн приходит с запада; когда мы смотрим на север или на юг, наш взгляд идет приблизительно параллельно гребням волн и их действие сказывается меньше (§ 21).

У вас, быть может, возникнет сомнение, что резкий контраст между морем и небом вызывается только быстрым ростом яркости неба у горизонта. Природа убеждает нас. На некоторое время часть западного неба окутывается пеленой перистых облаков, так что небо до высоты 30° становится равномерно белым; в этом направлении контраст между небом и морем мгновенно исчезает, и море становится гораздо зеленее и светлее. Как только перистые облака исчезают, контраст восстанавливается.

Степень, в которой цвет моря обусловлен отражением, не должна заставить нас пренебрегать другими факторами. Тут и там мы видим тени отдельных облаков. В тени море темнее, на Солнце оно кажется имеющим песочный цвет. Частично это явление контраста. Если вы посмотрите через отверстие полусжатого кулака или через отверстие нигрометра (§ 193), вы увидите, что в освещенных местах море си-

нее, хотя и менее, чем в затененных участках *). Во всех случаях тени ясно показывают, что цвет моря определяется не только отражением, часть света рассеивается назад из глубины. Тень становится видимой потому, что свет, рассеянный назад, здесь слабее, чем в других местах, в то время как отраженный свет не ослаблен (§ 233).

Будет ли песок на дне просвечивать сквозь воду и можно ли таким путем указать песчаные отмели на расстоянии? Нет, согласно моему личному опыту,— по крайней мере, если наблюдать мели с дюны или с берега. Песок виден только, если глубина очень мала, вероятно, от 10 до 20 *см*. Положение отмелей выявляется по образованию бурунов и по более спокойным пространствам между ними (§ 234).

Удивительно, что море у горизонта часто имеет кайму, переходящую из серого в голубое (или из голубого в синее), ее ширина не превосходит половины градуса. Она начинает исчезать, когда мы спускаемся с дюны к берегу и совершенно не видна, когда мы стоим на берегу у воды. Таким образом, это не явление контраста (§ 104). Вероятно, оно объясняется тем, что море сравнительно темное, и поэтому из-за рассеяния в воздухе (§ 189) становится синеватым на расстоянии **). Можно также представить себе, что море должно быть менее мутным на таком большом расстоянии от берега; такая чистая вода должна быть хорошо различима, если только мы стоим достаточно высоко, чтобы увидеть ее.

Позже Солнце переместится, и после полудня мы увидим тысячи сверканий в направлении, откуда оно светит. Мы не видим отраженного изображения самого Солнца — наш взгляд скользит слишком близко к поверхности воды; мы видим лишь часть бесконечной световой дорожки, которую оно бросает на беспорядочно волнующуюся поверхность. Море в этом направлении становится светло-серым, почти белым.

После захода Солнца море на западе отражает яркую зарю и золотую пелену перистых облаков; его колеблющаяся поверхность, смешивая отражения, показывает нам средний цвет западной части неба. К северу и югу, где краски неба бледнее, менее ярки и оттенки моря. Наш взгляд снова и снова привлекает к себе великолепие цветов на западе. Между золотыми облаками тут и там появляются чудесные пятна голубого неба, особенно выделяющиеся из-за контраста. Цвет неба постепенно становится оранжевым, море следует небу, а пена бурунов из-за контраста кажется фиолетовой. Перед нами на переднем плане лежит полоса мокрого песка, в которой правильно (без всяких смещений) отражается определенная часть неба,

*) Наиболее приятный синий цвет имеет море, когда оно совершенно спокойно, небо ярко-голубое, а Солнце закрыто облаком, так что море покрыто тенью.

**) Эта кайма отчетливо видна и в дни, когда небо равномерно серое, ветер средний и море темное.

сначала восхитительно голубая, позже — нежно-зеленая. Наконец, перистые облака на западе гаснут, их цвет становится темно-фиолетовым, им подчиняется цвет моря, и среди этих мирных вечерних тонов — тепло-оранжевая полоса мокрого песка на берегу.

### 3. Поднимается сильный ветер, пасмурно

Собирающиеся по всему морю волны увенчаны барашками, вдоль берега бегут четыре или пять полос пены. Юго-западный ветер гонит перед собой волны. Море такое же серое, как облака, разве чуть-чуть зеленоватое. Близ берега видны отдельные волны и становится ясным, что зеленоватый цвет связан с их передними склонами, которые отражают немного света, но, кроме того, излучают серо-зеленый свет, рассеянный в глубине. Вода кажется очень мутной — в волнующейся воде взвешено значительное количество песка. Море темнее всего на юго-западе, откуда дует ветер, к югу и особенно к северу его цвет становится светлее, приближаясь к серому цвету неба, хотя и остается несколько более темным (здесь мы смотрим параллельно волнам). Близ горизонта море синее — цвета темных низких облаков, которые обязаны своей синевой рассеянию на столь большом расстоянии (над нашими головами они, как обычно, светло- или темно-серые). Синий ободок у горизонта также заметен (стр. 314). Там, где на сером небе выделяется случайное темное облако, на поверхности моря намечается неопределенное, смещенное отражение темного сине-серого цвета. Горизонт нигде не вырисовывается четко, особенно на юге и на севере водяной туман, поднятый в воздух пеной бурунов, ограничивает область видимости несколькими километрами, море и воздух сливаются на некотором расстоянии.

Когда погода проясняется при северо-западном ветре, картина более или менее напоминает только что описанную, только небо представляет собой хаос голубых пятен, белых облаков, ослепительно освещенных Солнцем (со светло-желтым оттенком из-за воздушной перспективы, § 190), и темных синеватых масс. Во всех направлениях море отражает в среднем цвет неба на высоте от 20 до 30°. В этом отражении различаются только большие предметы и, яснее всего, залитые Солнцем облака, отбрасывающие солнечный свет на темное беспокойное море.

### 4. Шторм

Море еще скрыто дюной и домами, но уже слышно, как оно бушует. На берегу я вижу пенистые буруны, более двух третей моря покрыто кипящей пеной, белой на гребнях, грязно-белой и разорванной в клочья в долинах между волнами. Как обычно, передние склоны волн темнее на западе, чем на юге или севере, из-за этого вид на

западе кажется еще более диким и богатым контрастами. В открытом море из темной воды поднимаются гребни пены. Далеко на юге отчетливо выступает освещенная Солнцем полоска, ослепительно белая на покрытой пеной поверхности. Сначала очень узкая и длинная, она, постепенно приближаясь, охватывает большую область. Там, где нет пены, и освещенное Солнцем море отражает темные облака, отчетливо проявляется цвет песка. При таком освещении особенно силен свет, рассеянный в глубине моря, в частности потому, что бушующие волны поднимают много песка. На небе, местами очень темном, местами более светлом, несколько голубых просветов. Отражения еще заметны, хотя и очень неотчетливо, на общем фоне моря. Преобладает пена.

Наблюдайте освещение и цвет моря при различных ветрах и облачности. Сравните краски скалистого и песчаного побережья.

Наблюдайте цвет моря, когда вы купаетесь; смотрите на волны не только по направлению к морю, но и по направлению к берегу; найдите тени других купающихся и свою собственную. Пользуйтесь водяным телескопом.

Если у вас есть возможность пройтись вдоль пирса гавани, сравните спокойное море между двумя пирсами и вне гавани. Небо одно и то же, и различия возникают из-за различий в волнении или в мутности воды.

Наблюдайте общую яркость поверхности моря поздно вечером и ночью. Это лучшее время — нет мешающих различий в цветах и мелкие детали не привлекают нашего внимания.

Остерегайтесь контрастных явлений! Для сравнения участков неба и моря вы можете с успехом пользоваться маленьким зеркалом. Держите руку или другой темный предмет между сравниваемыми полями *A* и *B*; таким образом и *A* и *B* будут видны окаймляющими одно поле. Пользуйтесь нигрометром!

Не смешивайте тени и отражения облаков; они располагаются на совершенно различных местах. Когда на небе наблюдаются отдельные облака, распределение светотени по морю в целом зависит от сочетания отражений и теней.

## 236. Цвет моря, наблюдаемого с судна

По сравнению с берегом, здесь существует большое отличие — отсутствует прибой. Это делает всю картину вокруг наблюдателя гораздо более симметричной. Симметрия нарушается ветром, придающим определенное направление волнам, дымом корабля, действующим подобно темному облаку, пеной в кильватере и Солнцем.

Лучше всего наблюдать свет, приходящий из глубины близ корабля и позади него; сквозь воду непрерывно проходят облака воздушных пузырьков, медленно поднимающихся на поверхность. В этих местах ясно виден приятный зеленовато-голубой оттенок — такой же, как у белого брюха резвящихся вокруг корабля дельфинов или от белого камня, когда он падает в воду. Этот цвет можно видеть во всех океанах, независимо от того, имеет ли море в целом цвет индиго или зеленый.

Каждый раз, когда мы наблюдаем белые предметы на небольшой глубине, нам хочется сказать, что мы видим «цвет воды». Он объясня-

ется тем, что в воде поглощаются желтая, оранжевая и красная составляющие белого цвета, фиолетовая же рассеивается и не попадает к наблюдателю; таким образом, остается только зеленая, придающая воде характерную окраску. В местах, где среди бурлящих масс оказывается немного пены, часто наблюдается своеобразный пурпурный цвет, дополнительный цвет к зеленому, который нужно рассматривать как следствие одновременного цветового контраста (§ 109).

В мелком море, в окрестности порта или устья большой реки морская вода очень непрозрачна. Поэтому здесь сравнительно большое количество света рассеивается из воды назад, так что условия в какой-то степени близки к тем, в которых мы наблюдали рой воздушных пузырьков в следе корабля. Преобладает зеленый цвет, вероятно потому, что воды реки приносят в море гуминовые кислоты и соединения железа (§ 231), желтоватый цвет которых складывается с сине-зеленым цветом воды. На таком мелком зеленом море в спокойный день тени облаков имеют великолепный пурпурно-фиолетовый цвет (§ 240). «Цвет воды», который мы наблюдаем на неглубоко погруженных белых предметах, не есть, как правило, «собственный цвет» глубокого моря.

В то время как вода имеет зеленоватый цвет, море может быть голубым или цвета индиго, когда взвешенные в воде частицы очень мелки и рассеивают преимущественно голубой и фиолетовый цвета. Чтобы исследовать это, надо исключить отраженный свет, либо наблюдая передний склон волны, либо пользуясь одним из методов, указанных в § 233. Существуют заметные различия в «собственном цвете» глубокого моря; цвет зависит от того, какое море мы пересекаем. Распределение цвета, вообще говоря, таково *):

| | |
|---|---|
| оливково-зеленый . . . | севернее 40° северной широты |
| индиго . . . | между 40 и 30° северной широты |
| ультрамарин . . . | южнее 30° северной широты. |

Прекрасный голубой цвет тропических морей — это, по-видимому, следствие чистоты воды. Известно, что в высоких широтах в морской воде находится множество различных растительных и животных организмов. Можно считать весьма вероятным, что их коричневатый или зеленоватый оттенок может изменить цвет поверхности моря.

Иногда оливково-зеленые участки встречаются и на более низких широтах. Может быть, стоит попытаться проверить, меняется ли этот зеленый цвет на одном и том же месте с временами года; на это есть некоторые указания. Происхождение такой зеленой окраски определенных глубоких морей еще не удалось удовлетворительно объяснить. Наблюдения показывают, что вода этих морей содержит

*) Nature **84**, 87, 1910; Hulbert, J. Optic. Soc. Amer. **35**, 698, 1945.

большие количества взвешенных частиц. Однако, согласно расчетам, обычное поглощение, сочетаясь с рассеянием на больших частицах, может обусловить любой переход от темно-синего до светло-голубого или серого, но ни в коем случае не зеленый цвет. Поэтому одни приписывали его диатомовым водорослям или испражнениям птиц, питающихся этими водорослями, другие — желтому цвету рассеивающих частиц, которые могут быть, например, желтым песком. Общее изумление вызвало сравнительно недавно утверждение, что этот зеленый цвет возникает вследствие флуоресценции в некоторой органической субстанции *)! Как бы то ни было, наблюдения за влиянием времен года определенно указывают на органическое происхождение цвета; но это позже не было подтверждено.

Изредка морская вода кажется молочно-белой; очевидно, в этом случае близ поверхности должно находиться большое число взвешенных частиц, которые рассеивают свет в верхних слоях, и это рассеяние полностью подавляет поглощение.

## 237. Цвет озер **)

Озера придают большую прелесть горным пейзажам. Их глубина обычно достаточна, чтобы свести к минимуму действие цвета дна — в этом отношении они напоминают море. Но они отличаются от моря гораздо бóльшим спокойствием — и потому, что их водная поверхность гораздо меньше, и потому, что горы по берегам охраняют их от ветра. Поэтому правильное отражение от поверхности играет здесь гораздо более важную роль, чем на море; цвета заката нигде не отражаются так красиво, как в озере, и разнообразие тонов горных озер, по крайней мере частично, связано с отражением их берегов. Однако, если берега высоки и темны, они не отражаются от поверхности воды, и тогда большие участки озер имеют цвет света, который проник в воду почти по вертикали и испытал там рассеяние. Применяя методы, указанные в § 233, можно получить некоторое представление об этих «индивидуальных цветах». Они отличаются от озера к озеру. Их можно классифицировать как 1) чисто синие; 2) зеленые; 3) желто-зеленые; 4) желто-коричневые. Более тщательное исследование в лаборатории показывает, что вода синих озер совершенно чиста и что окраска возникает из-за поглощения в воде оранжевой и красной частей спектра. Что касается цветов 2), 3) и 4), то здесь постепенно увеличивается концентрация железных солей и гуминовых кислот.

Очень часто зеленый цвет небольших озер вызывается микроскопическими зелеными водорослями (возможно, *Stichococcus*, *Synedra*,

---

*) R a m a n a t h a n, Phil, Mag. **46**, 543, 1923.
**) Arch. sc. phys. nat. **17**, 186, 1904; **10**, 101, 1905.

*Ulvella*), растущими здесь в громадных количествах; часто они еще совершенно зеленые зимой, когда деревья обнажены и все покрыто снегом.

Красное окрашивание может быть вызвано микроскопическими организмами: *Beggiatoa, Oscillaria rubescens, Stentor igneus, Daphnia pulex, Euglena sanguinea, Peridinia.*

О поляризации см. § 238.

## 238. Наблюдения цвета воды при помощи николя *)

Николь, как вы помните, пропускает лишь те световые волны, плоскость электрических колебаний которых параллельна его короткой диагонали. Так как у света, отраженного от воды, колебания направлены главным образом горизонтально, мы можем ослабить этот отраженный свет, держа николь так, чтобы его короткая диагональ была вертикальна. Это ослабление будет наибольшим, если наблюдать под углом в 53° к вертикали («угол поляризации»). Испытайте это после дождя на маленькой придорожной луже. Станьте приблизительно в 5 *м* от лужи и смотрите сквозь николь, направив его короткую диагональ вертикально. Эффект будет удивителен. Вы увидите дно лужи почти так же хорошо, как если бы лужи вообще не было. Поворачивайте николь то в одну, то в другую сторону: вы увидите, как лужа становится то больше, то меньше.

Как правило, николь усиливает цвета мокрого берега, морских водорослей, гранитных обломков, влажной дороги, табачного поля, окрашенных поверхностей,— короче говоря, всего, что отражает свет. Причина в том, что николь уничтожает часть поверхностных отражений, из-за которых к цвету самого предмета примешивается белый. Если смотреть сквозь николь с вертикальной короткой диагональю, увеличивается контраст между участками спокойного моря, лежащими в тени облаков, и освещенными Солнцем. Исключаются отраженные на поверхности лучи, и поэтому различия в рассеянном свете выступают яснее.

Николь также усиливает контраст между участками моря, покрытыми маслянистой пленкой и лишенными такой пленки (§ 233). Возможно, это связано с тем, что на покрытых зыбью участках свет отражается под другим углом, чем на спокойных, или с тем, что поляризация при отражении искажается маслянистым слоем.

Действие николя особенно удивительно в ветреную погоду. Посмотрите на бушующие волны сквозь николь с вертикальной короткой диагональю: море покажется гораздо более бурным, чем

---

*) C. R. Paris **108**, 242 и 337; **109**, 412, 1889; E. O. H u l b e r t, J. Optic. Soc. Amer. **24**, 35, 1934. Вместо николя можно воспользоваться и поляроидом; однако поляроид часто бывает окрашен, что мешает наблюдению цветов.

сквозь николь с горизонтальной короткой диагональю! В первом случае николь исключает отраженный свет, делая поверхность моря темнее, в то время как пена, сохраняющая свою яркость, становится еще более поразительной.

Часто сквозь николь, ориентированный определенным образом, горизонт выявляется более четко. Если утром смотреть под прямым углом к Солнцу, мы увидим, что море становится значительно темнее, а ясное небо — относительно ярче, когда плоскость световых колебаний вертикальна (§ 233). Поэтому поляроиды иногда применяются в современных секстантах.

Следующие эксперименты относятся к поляризации света, рассеянного в глубоких тропических морях, вода которых чиста *).

Пусть Солнце достаточно высоко и поверхность воды спокойна. Станьте спиной к Солнцу и смотрите на воду под углом, более или менее близким к углу поляризации, держа николь так, чтобы его короткая диагональ была вертикальна. Отраженный свет исключается, и вы можете видеть восхитительное синее сияние света, приходящего из глубины после рассеяния. Поверните николь так, чтобы его короткая диагональ была горизонтальна: море будет казаться теперь менее синим, чем без николя.

Проведите этот эксперимент также и тогда, когда Солнце находится на умеренной высоте, по-прежнему держа короткую ось вертикально и меняя азимут. Особенно интересно сравнить цвета по направлению к Солнцу и в противоположном направлении. По направлению к Солнцу вы видите темный цвет индиго. Дело в том, что, смотря перпендикулярно к солнечным лучам, вы исключаете не только отраженный, но и рассеянный в глубине воды свет. В направлении от Солнца цвет представляется ярко-голубым; вы смотрите почти по направлению солнечных лучей, проникающих в воду, и свет, рассеянный назад в вашем направлении, почти не поляризован. Эти опыты указывают, что свет, рассеянный в море, сильно поляризован, подобно рассеянному в воздухе (§ 189). Это в свою очередь указывает, что рассеяние происходит на очень малых частицах, возможно — на самих молекулах воды.

Используя николь, удалось открыть характерное различие между светом, рассеянным «назад», в голубых и в темно-коричневых озерах. Для этого нужно смотреть в направлении к Солнцу, исключая отражение при помощи водяного телескопа (§ 233). Николь покажет нам, что в голубых озерах плоскость колебаний рассеянного назад света горизонтальна, как и следует ожидать, когда рассеивающие частицы очень малы; в то же время большие частицы в коричневых озерах рассеивают практически неполяризованный свет, у которого (по выходе из воды несколько преобладает вертикальная компонента на конце водяного телескопа должно быть стекло).

*) C. V. Raman, Proc. Roy. Soc. **101A**, 64, 1922.

## 239. Шкалы для оценки цвета воды *)

Обычно пользуются шкалой Фореля. Нужно приготовить синий раствор медного купороса и желтый — хромовокислого калия:

а) 0,5 *г* $CuSO_4$ в 5 *см*³ нашатырного спирта+вода до 100 *см*³;

б) 0,5 *г* $K_2CrO_4$ в 100 *см*³ воды.

Приготовьте следующие смеси (с—синий, ж—желтый):

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1) | 100 | с | +0 | ж | 6) | 80 | с | +20 | ж | 10) | 46 | с | +54 | ж |
| 2) | 98 | » | +2 | » | 7) | 73 | » | +27 | » | 11) | 35 | » | +65 | » |
| 3) | 95 | » | +5 | » | 8) | 65 | » | +35 | » | 12) | 23 | » | +77 | » |
| 4) | 91 | » | +9 | » | 9) | 56 | » | +44 | » | 13) | 10 | » | +90 | » |
| 5) | 86 | » | +14 | » | | | | | | | | | | |

Нередко необходимы коричневатые цвета, особенно при оценке цвета озера. Коричневый раствор можно приготовить так:

0,5 *г* сульфата кобальта+5 *см*³ нашатырного спирта+вода (до 100 *см*³).

Смешайте этот раствор с зеленым раствором (№ 11 по шкале Фореля) в следующих пропорциях (з—зеленый, к—коричневый):

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1) | 100 | з | +0 | к | 5) | 86 | з | +14 | к | 9) | 56 | з | +44 | к |
| 2) | 98 | » | +2 | » | 6) | 80 | » | +20 | » | 10) | 46 | » | +54 | » |
| 3) | 95 | » | +5 | » | 7) | 73 | » | +27 | » | 11) | 35 | » | +65 | » |
| 4) | 91 | » | +9 | » | 8) | 65 | » | +35 | » | | | | | |

Эти смеси можно держать в пробирках диаметром около сантиметра. Главная трудность в применении этой шкалы — установить, какую точку на поверхности воды следует выбрать за точку сравнения. Обычно пытаются оценить «собственный цвет» самой воды.

Не обязательно прибегать к помощи шкал. Другой путь состоит в том, чтобы попытаться воспроизвести цвет воды на рисунке, который в будущем и используется для сравнений.

## 240. Тени на воде

*...Когда бы мы ни видели тень на чистой и, в известной мере, даже и на грязной воде, это не темное, как на земле, пятно полумрака, в котором общий солнечный тон стал слабее, это пространство совершенно другого цвета, существующее само по себе, со своей способностью к отражению, бесконечно разнообразному по глубине и оттенкам, и способное при определенных обстоятельствах вообще исчезнуть.*

*(Р е с к и н, Современные художники)*

Свет, приходящий к нам от поверхности воды, частично идет от самой поверхности, а частично от более глубоких слоев. Если мы преградим путь падающим лучам, освещение может измениться.

---

*) W. U l e, Peterm. Mitt. **38**, 70, 1892.

## 1. Влияние тени на отраженный свет

«Когда поверхность покрыта зыбью, каждая маленькая волна на определенном с каждой стороны расстоянии от наблюдателя и при определенном угле между наблюдателем и Солнцем, зависящем от величины и формы зыби, отражает маленькое изображение Солнца (ср. § 17). Именно поэтому так часто видно на море ослепительное поле света. Любой предмет между Солнцем и этой зыбью уменьшает интенсивность отражения Солнца, а следовательно, и свет зыби; таким образом, каждый промежуточный предмет отбрасывает на это пространство как бы темную тень, той же формы и на том же месте, что и настоящая тень» (Рескин, «Современные художники»).

В справедливости слов Рескина лучше всего убедиться в ветреную ночь, когда, например, вода канала покрыта сильной рябью. Прогуливаясь вдоль канала, мы видим отражения уличных фонарей, появляющиеся в виде неправильных, колеблющихся пятен света, по которым непрерывно скользят тени, например, тени деревьев между фонарями и каналом. Мы замечаем присутствие этих теней на воде лишь из наиболее благоприятной для наблюдений точки: они видны лишь внутри малого телесного угла. Рескин долго спорил с заинтересованными лицами, можно ли вообще в этом смысле говорить о «тенях». Разумеется, это спор о словах!

Совершенно другой эффект проявляется тогда, когда Луна отражается в длинной световой дорожке и мы внезапно видим темный, черный силуэт плывущей лодки, скользящей перед этой светящейся полоской. Сама лодка кажется темным предметом на светлом фоне, но она также отбрасывает тень по направлению к нам на покрытую зыбью воду. Здесь приложимы приведенные выше соображения.

## 2. Влияние теней на свет, рассеянный в глубине

Тени ясно заметны на мутной воде; степень четкости теней служит прямым указанием на мутность или чистоту воды. Заметьте тени мостов и деревьев на реках и каналах. На море попытайтесь найти свою тень на воде. Вы увидите ее с той стороны, где корабль взволновал воду и она смешана с воздушными пузырьками, но не там, где море прозрачно. Наблюдайте тени облаков на поверхности моря.

Тень становится видимой потому, что свет, который проникает в воду и возвращается после рассеяния, на этих участках поверхности менее интенсивен, чем повсюду. С другой стороны, свет, отраженный на поверхности, не ослабляется, и поэтому его относительная роль возрастает. Это объясняет, почему при голубом небе тени облаков на море часто синеваты, хотя из-за контраста с окружающим зеленым цвет может сместиться несколько к пурпурному. Кроме прозрачности воды, важно также направление, в котором

ведется наблюдение. Купаясь в очень прозрачной воде, вы не увидите теней; купаясь в чуть-чуть мутной воде, вы увидите лишь свою собственную тень, но не тени других купающихся; в очень мутной воде вы увидите тени всех купающихся. Убедитесь сами, что тень, отбрасываемая столбом на очень мутную воду канала, видна только в том случае, если вы находитесь в плоскости, проходящей через Солнце и столб, и следовательно, ваш взгляд обращен к той части неба, где находится Солнце. Именно в этот момент, если вы идете вдоль канала, внезапно появится тень. Это то же явление, что и описанное в связи с туманом.

Тени на слабо замутненной воде показывают еще и другое явление — их края о к р а ш е н ы: близкий к нам в синеватый, далекий — в оранжевый цвет. Это явление можно наблюдать на тени каждого столба, моста или корабля. Оно вызвано рассеянием на бесчисленных частицах пыли, взвешенных в воде, многие из которых настолько малы, что рассеивают преимущественно синие лучи. Из рис. 174 видно, что с обращенной к нам стороны частицы видны светящимися на темном фоне, так что они посылают в наш глаз синеватые лучи; в то же время у отдаленной от нас стороны тени мы видим свет от дна (или от рассеивающей воды по соседству), лишенный синих лучей и окрашенный в оранжевый цвет неосвещенными частицами в тени. Таким образом, это явление совершенно подобно голубому небу и желтому заходящему Солнцу (§ 197). Наш глаз особенно чувствителен к нему из-за контраста двух цветов вдоль краев.

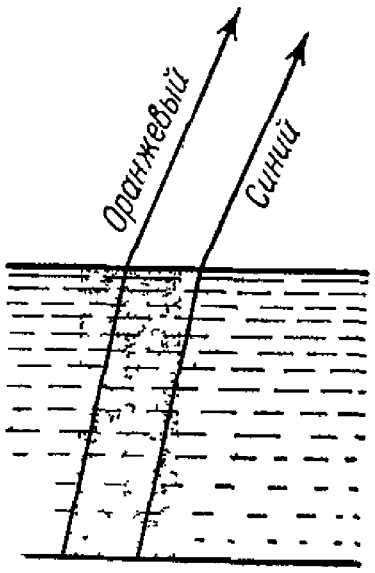


Рис. 174 Как возникает окраска краев тени в мутной воде.

Рассеяние света в воде, которое действует одновременно с рассеянием на пылевых частицах, также окрашивает края теней. Относительное значение обоих факторов зависит от содержания частиц в воде.

## 241. Световой ореол около нашей тени на воде *) (фотография XXIII)

*Я смотрел на тонкие спицы вокруг очертаний моей головы в освещенной Солнцем воде ..*
*Тонкие световые спицы, разбегающиеся от очертаний моей головы, от очертаний каждой головы, в освещенной Солнцем воде.*
*(W a l t W h i t m a n, Crossing Brooklyn Ferry)*

Это красивое явление лучше всего наблюдать, стоя на мосту или на палубе корабля, когда тень падает на неугомонно волнующуюся воду. Тысячи светлых и темных черточек разбегаются во всех направлениях от тени вашей головы. Этот ореол можно видеть только

*) K. K a l l e, Ann. Hydr. **67**, 22, 1939.

вокруг тени своей головы (ср. § 185). Лучи сходятся в одну и ту же точку только приблизительно. Другой замечательный факт—общий рост яркости вокруг тени.

Ничего подобного не видно ни на спокойной воде, ни даже на правильных волнах; явление хорошо наблюдается лишь тогда, когда на поверхности воды поднимаются неправильные маленькие холмики. Вода должна быть мутной — чем дальше от берега в открытое море, тем слабее становится ореол *). Ярче всего ореол бывает около тени, а затем постепенно слабеет.

Объяснение этого явления состоит в том, что каждая неровность на поверхности воды отбрасывает позади себя полоску света или тени. Все они параллельны линии, соединяющей Солнце и наш глаз, так что в перспективе они сходятся в противосолнечной точке — т. е. в теневом изображении нашей головы.

Полоски временами так ясны, что их можно проследить на значительном угловом расстоянии от противосолнечной точки. Обычно, однако, они яснее всего около самой противосолнечной точки, поскольку в этом направлении наш взгляд проходит длинный путь либо сквозь отчетливо освещенную, либо сквозь затененную воду. Рост общей интенсивности света в окрестности тени, по-видимому, следует приписать тому, что частицы сильнее рассеивают назад, чем перпендикулярно падающему лучу (§ 189).

Подобный же ореол можно наблюдать, стоя в тени одиночного дерева, распростертые ветви которого бросают пятна света и тени на воду внизу. Лучи света, проникая в воду, создают тот же самый оптический эффект, что и неровности на поверхности.

Интересно, что в действительности световые лучи не идут параллельно линии, соединяющей Солнце и глаз, но вследствие преломления отклоняются на определенный угол. Но, с другой стороны, и глаз видит путь этих лучей в воде преломленным, так что в конце концов часть луча, проходящая в воде, видна как продолжение части, проходящей сквозь воздух **).

### 242. Ватерлиния корабля

*Три обстоятельства маскируют линию соприкосновенения воды и дерева: когда волны тонки, цвет дерева слегка просматривается сквозь них; когда волны спокойны, цвет дерева в какой-то мере отражается в них; когда волны разбиваются, пена более или менее заслоняет и искажает линию соприкосновения.*

*(Р е с к и н, Современные художники)*

Можно, однако, в равной степени утверждать, что мы *видим* ватерлинию благодаря тем же самым обстоятельствам! Понаблю-

*) C. V. R a m a n, Proc. Roy. Soc. **101A**, 64, 1922.
**) Physica **11**, 368, 1931.

дайте за стоящим или плывущим кораблем: по каким оптическим явлениям мы судим о том, где начинается вода, т. е. о положении ватерлинии?

### 243. Цвета водопадов *)

При благоприятном освещении часто можно видеть зеленый цвет воды, падающей со скал. Замечательно, что скалы, тут и там выглядывающие из воды и в действительности черные или серые, кажутся красноватого оттенка. Это, очевидно, объясняется одновременным цветовым контрастом (§ 109).

Яснее это явление наблюдается там, где вода пенится и брызжет. Известно, что в лаборатории одновременный цветовой контраст проявляется с большей интенсивностью, когда границы между полями неотчетливы. Чтобы воспроизвести рассматриваемый случай, положим полоску серой бумаги на зеленый фон, прикрыв ее сверху маленьким листиком папиросной бумаги. Мы увидим, что под этим листком серое вследствие контраста приобретет красивый красноватый цвет. Возможно, что в природе подобную роль играет полупрозрачный водяной туман.

### 244. Цвет твердых тел

Наблюдая за поверхностью рек, морей и просто луж, мы могли ознакомиться с тем, как отражается свет в воде, будь то на поверхности воды или в глубине ее, куда проникает свет и откуда он рассеивается частицами.

Это послужит нам моделью для того, чтобы понять, как освещаются твердые тела и как они отражают свет.

В скалах, горных породах, земле и стволах деревьев, которые считаются «непроницаемыми», рассеяние и поглощение намного больше, но оптическое явление по существу остается тем же, только то, что в воде происходит в слоях, измеряемых метрами, здесь происходит в тонком слое близ поверхности тела. Типичные черты твердого тела проявляются лишь постольку, поскольку поверхность показывает нам всевозможные степени ровности, бугристости или тусклости. Мы можем говорить тогда о правильном или неправильном отражении, или о рассеянии света.

Предметы, которые дают правильное отражение,— редкое явление в пейзаже. В этом случае мы прежде всего начинаем думать о гладкой поверхности льда, об оконном стекле, металлических предметах или обледеневших ветвях дерева.

В городах и поселках, где крыши домов покрываются черепицей, можно часто наблюдать, как глазурь черепицы сильно отражает свет. Обратите внимание, как блестит издалека шифер крыши.

*) Richard, Wetter **34**, 69, 1917.

Мы часто замечаем, как чудесно сверкают только что выпавшие снежинки, если мы случайно оказываемся в направлении, в котором они отражают солнечный свет.

Если смотреть на мостовую под косым углом, на ней можно увидеть такие же световые дорожки, какие мы видим на волнующейся поверхности воды.

Характерной особенностью тел, не только отражающих свет на своей поверхности, но и рассеивающих его, является то, что одновременно создаются отражение и тень предмета. Мы наблюдали это на облаках над морем. Другим примером могут служить птицы, порхающие над мокрым песком, если в это время светит Солнце.

В большинстве случаев твердые тела имеют матовую поверхность; к тому же эта поверхность бывает, как правило, неровной, она больше рассеивает свет, чем отражает. Солнечный свет, падающий на пашню, песчаную поверхность или снег, освещает их так, что они становятся видимыми в любом направлении. Но при более пристальном наблюдении мы замечаем, что рассеивание света твердыми телами бывает неодинаковым в различных направлениях.

Вечером обратите внимание на то, как хорошо освещен участок земли под каждым фонарем, в то же время все вокруг кажется вам совершенно черным. Отойдите подальше и определите, по мере возможности, где находится самая яркая точка светового пятна, бросаемого на мостовую. Если теперь подойти поближе, можно заметить, что эта точка находится не под фонарем, как вам это казалось, а несколько *ближе к вам*. Таким образом свет рассеивается неравномерно в разных направлениях, и мостовая может служить примером перехода от направленного отражения к равномерному рассеянию.

Другой метод изучения асимметрии отражения состоит в сравнении вида пейзажа в направлении к Солнцу и от Солнца (§ 250). В результате большого разнообразия поверхностей, рассеивающих свет, возникают мягкие переходы от светлого к темному, от одного оттенка к другому, а отражение воды и других гладких поверхностей создает светлые тона, оживляя своим блеском пейзаж в целом.

### 245. Рассеяние света ветвями деревьев, покрытых инеем

Когда после устойчивых морозов вдруг начинается оттепель, деревья и стены домов покрываются слоем льда, состоящим из тысяч изящных кристалликов. Они-то и рассеивают свет весьма своеобразным образом.

Если посмотреть на покрытую инеем поверхность под прямым углом, этот ледяной налет кажется почти незаметным. Под косым углом стена покажется нам ярче, чем обычно, а если посмотреть на нее, подойдя вплотную, она станет серебряной.

Очевидно, каждый кристаллик рассеивает свет во всевозможных направлениях подобно маленькой лампочке. Чем под большим углом мы будем смотреть, тем больше мы будем видеть этих источников света внутри данного угла. Яркость поверхности, наблюдаемой под углом $\vartheta$, возрастает пропорционально $\sec\vartheta$ до тех пор, пока мы не приблизимся совсем вплотную к стене, когда кристаллики начинают как бы заслонять друг друга. Мне кажется, что своеобразие этой картины объясняется тем, что отдельные кристаллики разделены довольно большими расстояниями, вследствие чего только при наблюдении под очень малым углом достигается максимум яркости.

Аналогичное явление можно наблюдать на ярко-белой поверхности, обрызганной мелкими капельками воды.

## 246. Цвет зеленой листвы

Отдельные листья, деревья, луга, поля показывают бесконечное разнообразие оттенков зеленого. Чтобы раскрыть какие-нибудь закономерности в этом многообразии, начнем с исследования одного листа какого-нибудь «обычного» дерева (дуба, вяза или бука) в надежде понять, как образуются в пейзаже цветовые группы.

Лист дерева обычно гораздо сильнее освещен с одной стороны, чем с другой, и цвет существенно зависит от того, с какой стороны мы смотрим. С освещенной стороны лист частично отражает свет, и цвет листа становится более светлым и более серым. Кроме того, когда лист освещен спереди (по отношению к наблюдателю), к зеленому примешивается синеватый оттенок, в противном случае — желтый. Это напоминает наши наблюдения рассеяния света (§ 189). И действительно, в листе, хотя его толщина много меньше 1 *мм*, происходят те же процессы отражения, поглощения и рассеяния, что и в океане глубиной в сотни метров. Поглощение вызывается здесь зернами хлорофилла, рассеяние, по-видимому, связано с бесчисленными включениями разного рода, которыми так богаты клетки, или с неровностями поверхности листа.

С оптической точки зрения лист — более сложный объект для наблюдения, чем озеро или море, поскольку он освещен не с одной стороны, а с двух, причем одна его сторона — матовая, а другая — блестящая. В то же время сила и цвет света, падающего на разные стороны листа, часто бывают различными.

Изумрудная зелень ярко освещенной сзади травы особенно хороша, когда она видна на темном фоне, а наблюдатель находится в тени (рис. 175, *а*). Кажется, что каждая былинка буквально освещена зеленым огнем изнутри. Падающий на нее свет рассеивается миллионами крошечных зерен, и былинка отбрасывает поток света в сторону, к нашему глазу.

Различие в цвете травы, освещенной спереди и сзади, можно заметить сразу, если, стоя на лугу, смотреть попеременно в направлении к Солнцу и от него. Это различие соответствует знакомому художникам различию между зеленью на пейзажах Виллема Мариса, писавшего против света, и зеленью Мова, который предпочитал освещение сзади.

Освещение листьев прямыми лучами Солнца и светом голубого неба различно. Прямой свет Солнца сильнее, но он отражается в

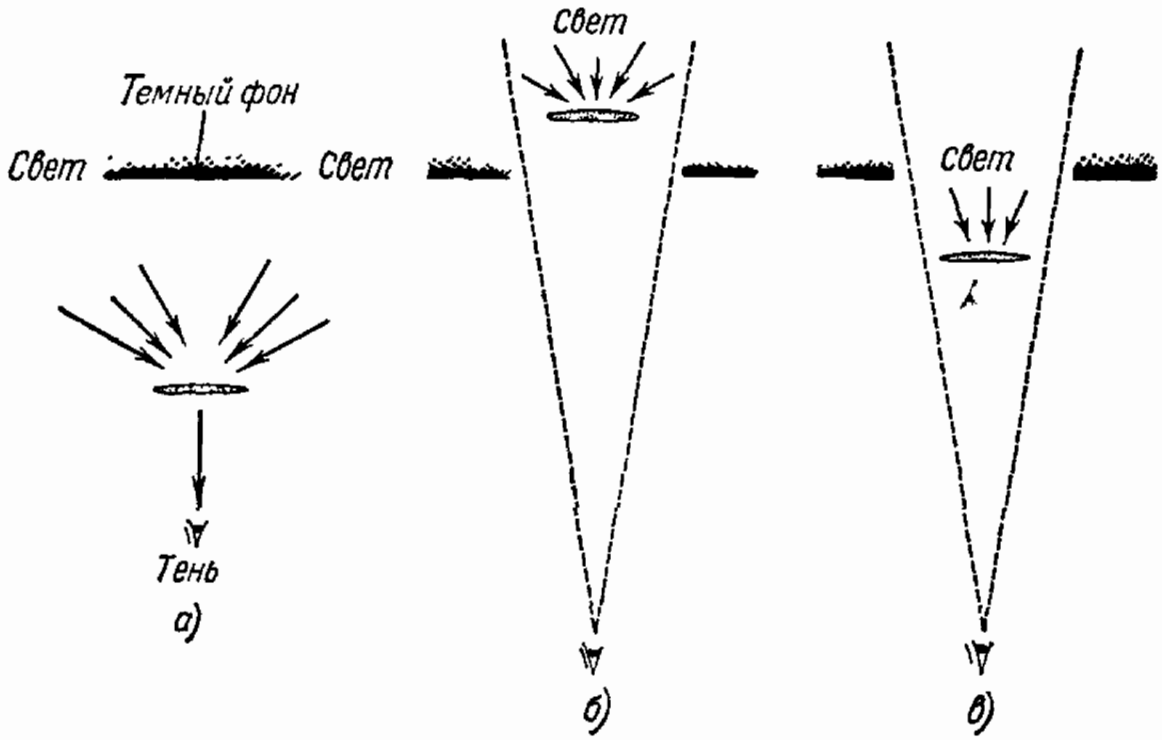



Рис. 175. Зеленая листва при различных условиях освещения.

отдельных местах, так что лист кажется пестрым. Если лист отражает солнечные лучи более или менее правильно под углом, близким к углу отражения, цвет его приближается к светло-серому или белому. Когда Солнце очень низко и пейзаж залит глубоким красным светом, листва деревьев теряет свой свежий зеленый тон и кажется увядшей: источник света не посылает зеленых лучей, которые могли бы рассеяться листвой.

Верхняя и нижняя сторона листа различаются в цвете даже при одинаковом освещении. Верхняя сторона листа гладка, лучше отражает и потому кажется более пестрой. Нижняя тусклее и бледнее, на ней имеются поры, клетки располагаются дальше друг от друга и есть промежутки, наполненные воздухом, которые отражают свет прежде, чем он проникает внутрь листа (§ 248). Верхняя сторона листа, как правило, бывает освещенной. Заметьте различие в цвете, когда вы поворачиваете лист на 180°, сохраняя прежнее освещение! Когда ветер достаточно силен, листья поворачиваются во всех направлениях, и их верхняя сторона видна так же часто, как нижняя,— деревья с освещенной стороны кажутся пятнистыми, а общий цветовой фон — более бледным, чем обычно.

Молодые листья имеют более свежий и светлый цвет, чем старые; это различие становится менее заметным к концу лета.

Наружные листья кроны дерева отличаются от внутренних не только по величине, толщине и опушенности, но также и по цвету. Цвет побегов у подножия дерева и у ствола обычно очень светлый.

Наконец, важную роль играет *фон*. Станьте под деревом и присмотритесь к его кроне. Листья свежей зелени, которые мы видели на фоне других деревьев, на фоне неба превращаются в темные силуэты. Это вызвано контрастом яркости листьев и яркости неба как фона. Эффект слаб, если лист освещен со всех сторон, особенно если на него светит Солнце (рис. 175, *б*); сильнее всего он тогда, когда лист получает свет только от ограниченного участка неба. Обычно это происходит, когда дерево окружено другими деревьями (рис. 175, *в*) или при одностороннем сумеречном освещении. Различие между обычной зеленью и черным силуэтом тогда так велико, что лишь с трудом можно поверить, что это лишь оптическая иллюзия — не что иное, как проявление контраста: яркость неба по сравнению с яркостью земных объектов огромна.

## 247. Прямое влияние света на цвет зеленых листьев

Кроме рассмотренных в § 246 оптических эффектов, сам свет вызывает в растениях непосредственные изменения, благодаря чему их цвет меняется в течение нескольких минут.

В тени хлорофилловые зерна так распределяются между клетками внешней и внутренней стороны листа, что растения кажутся нам свежезелеными. Когда растение обращено к Солнцу, то хлорофилловые зерна, наоборот, концентрируются в глубине листа, и листья благодаря этому кажутся нам желтоватыми. Так это наблюдается у ряски.

Листья некоторых растений (например, борца) блестят под влиянием Солнца и ветра так, будто они лакированные. Это вызывается набуханием эпидермических клеток, растягивающих поверхность листа, пока она не становится совершенно гладкой.

## 248. Растительность в пейзаже*)

### 1. Отдельные деревья

Среди всех элементов, образующих пейзаж, практически только у освещенных сбоку деревьев можно видеть чудесную прелесть контраста между залитой Солнцем и затененной частью дерева.

---

*) Относительно первой части этого параграфа см. V. Cornish, Geogr. Journ **67**, 506, 1926.

Именно они производят впечатление чего-то объемного, «показывающего снова и снова, что пространство, с его тремя измерениями есть видимая реальность». Этот контраст смягчается округлостью дерева, но подчеркивается различием цветовых оттенков.

Деревья на далеком светлом фоне кажутся темными; расстояние до фона, его отдаленность ощущаются гораздо определеннее. Это в такой же степени объясняется стереоскопическим эффектом, как и различием в цвете. Именно поэтому деревья так часто помещают на переднем плане стереоскопических изображений и пейзажей в живописи. До некоторой степени это можно сравнить с впечатлением от пейзажа, который мы видим через открытое окно или через проем арки. Городские здания, когда они видны сквозь высокие деревья, кажутся больше и величественнее.

Наиболее удивительный контраст с фоном наблюдается у дерева, вырисовывающегося против оранжевой вечерней зари. Силуэты фантастически изогнутого можжевельника на одиноком песчаном холме или гордой ели с ее плотным одеянием из хвои кажутся черными и вырисовываются очень резко. Другие деревья более ажурны; прозрачнее всего береза с ее грациозными арабесками; ее цвет, особенно на светлом фоне, приятно контрастирует с цветом неба.

*Солнечным утром в конце февраля я покажу вам березовые ветви на фоне лазурного небосвода. Каждая тонкая веточка кажется объятой пурпурным огнем, и сквозь это прелестное сияние на вас с чудесной нежностью смотрит небо. Ждите, внимательно присматривайтесь, и не уходите, пока не поймете. Это такое ощущение счастья, что можно терпеливо ждать зимы, лишь бы снова появился этот чудесный свет.*

*(D u h a m e l, La possesion du Monde)*

## 2. Л е с а

Силуэт близкого леса на светлом фоне кажется неровным, но сами деревья слишком прозрачны, а создаваемые ими световые эффекты слишком разнообразны, чтобы произвести впечатление силы и массивности. Единство сильнее подчеркивается на больших расстояниях, когда верхушки деревьев светятся золотом и зеленью на фоне уходящей вдаль синевы холмов или когда залитые Солнцем отдельные группы лиственных деревьев выступают на темном фоне высоких елей. Далекий лес на равнине можно сравнить с рядом холмов, его тень не менее темна, его цвет из-за рассеяния в атмосфере становится чудесным туманно-синим, из-за воздушной перспективы он расчленяется на отдельные ряды (§ 104).

Внутри леса вид совершенно своеобразен; здесь нет ни горизонта, ни определенных очертаний. Весной мы видим повсюду над

головой молодую зелень листьев, окрашенных в желто-зеленый цвет проходящим светом. Летом, после утомительного сверкания белого неба, на которое так трудно смотреть, наши глаза здесь отдыхают.

Лес сильнее всего освещен в полдень, когда Солнце высоко и его лучи пронизывают верхушки деревьев. Игра света и тени очень разнообразна; прелесть ее исчезает, как только мы фокусируем глаз на определенном расстоянии, но снова появляется, когда мы не пытаемся найти ее, а спокойно отдаемся естественному влиянию окружения. Осенними утрами солнечные лучи кое-где проскальзывают между стволами и можно проследить их путь в чуть туманном воздухе, особенно, если смотреть в направлении, близком к Солнцу (§ 206); в эти моменты особенно чувствуется очарование воздушной перспективы.

## 3. Цветы

У нас в Нидерландах, пожалуй, только вереск покрывает большие площади. В августе, когда он в полном цвету, царит изысканная гармония цветов — пурпурная земля и темно-голубое небо. Некоторым это не нравится, но зато на других это обилие света в природе производит очень сильное впечатление. Серые облака, покрывающие небо, смягчают гармонию цветов и в то же время уменьшают контрасты светотени.

Фруктовые деревья в цвету в значительной степени обязаны своим великолепием слабому развитию листвы в это время года. Белое или блекло-розовое красивее всего, когда их освещает Солнце на фоне голубого неба или когда мы видим их с вершины холма на фоне лугов.

Особенно красивые и яркие цвета имеют весной голландские цветочные поля, разбитые на геометрически правильные квадраты и прямоугольники.

## 4. Луга

Горизонтальная поверхность одного цвета создает впечатление спокойствия и открытого пространства и к тому же множество достаточно разнообразных деталей придают ей жизнерадостность и мягкость.

Почему, однако, занятые песком пространства создают совершенно другое впечатление?

На расстоянии зелень становится синеватой, а еще дальше она все более и более приближается к воздушной голубизне неба.

## 249. Тени и темные пятна

Присмотритесь, где вокруг вас видны темные пятна:

1) в лесах и кустарниках — это промежутки между стволами и ветками;

2) в городе — это открытые окна, видимые издалека.

Оба эти случая служат превосходным примером «черного тела», как его называют физики: это — пространство, в которое можно заглянуть лишь через небольшое отверстие; лучи света, попавшие внутрь, могут выйти наружу, лишь испытав значительное число отражений, существенно ослабевая после каждого отражения. Такое тело поглощает почти все лучи — темный лес отражает лишь 4% падающего света. С другой стороны, следует иметь в виду, что темнота леса лишь относительна. Если подойти ближе, глаз адаптируется к свету, и мы видим, что все в лесу освещено и имеет свой цвет. Подобным же образом, находясь в комнате, можно различить в ней все детали, но та же комната снаружи сквозь открытое окно кажется очень темной.

Тонкие предметы, вырисовывающиеся на фоне яркого неба, обычно кажутся черными, но это лишь из-за контраста (§ 253).

В открытом пейзаже тени никогда не бывают густо-черными, потому что на них падает свет неба; их яркость составляет по меньшей мере 20% яркости ландшафта, освещенного Солнцем.

Систематически наблюдайте цвет теней!

«Самая обычная тень всегда как-нибудь окрашена, она никогда не бывает черной, или почти черной... В действительности тени окрашены так же сильно, как и освещенные части»,— пишет Рескин

Там, где светит Солнце, его сверкающие желтоватые лучи господствуют над светом, излучаемым небом; но в тень попадает свет только от голубого или серого неба. Тени поэтому вообще «голубее» окружения. Это различие еще подчеркивается контрастом.

*Из моего окна я вижу тени людей, гуляющих по берегу. Песок сам по себе фиолетовый, но Солнце делает его золотым; тени этих людей такие фиолетовые, что земля кажется желтой.*

*(Делакруа)*

Выберите место со свободным обзором и положите лист белой бумаги с небольшим наклоном к горизонту так, чтобы солнечный свет почти скользил вдоль нее. Если теперь держать карандаш горизонтально в 1 *см* над бумагой, вы увидите две тени: резкую голубую тень и размытую желтоватую тень — первая освещается только небом, вторая — низко стоящим Солнцем *). Кусок кар-

*) W. Maier, Zs. f. Meteor. **4**, 16, 1950; Meteor. Rundsch **6**, 62, 1953; R. Meier, Zs. f. Meteor. **4**, 245, 1950.

тона, прислоненный к экрану под определенным углом, отбрасывает тени и полутени различных оттенков, которые из-за контраста кажутся более резкими *). Светлые облака изменяют тени и их цвета, яркость и оттенок теней определяется общим распределением яркости. Если Солнце полускрыто облаками, тени становятся расплывчатыми; если оно вообще исчезает, больше не видно падающих теней, но по-прежнему сохраняются более светлые и более темные участки.

«Присмотритесь в сумерки на улицах в облачный день, какая красота и нежность царят на лицах мужчин и женщин!» (Леонардо да Винчи).

Это замечание примиряло меня с тусклым, серым днем!

Ночью свет дуговой лампы (т. е. более или менее точечного источника света), господствующий над всеми другими источниками, отбрасывает очень резкие тени и, выделяя морщины на лицах, заставляет их казаться старыми.

Существуют все виды переходов между резкими тенями от Солнца и приходящим со всех сторон рассеянным светом облачного неба. Например, на открытом месте в лесу, которое освещается ограниченным участком неба, картина меняется в соответствии с тем, велик или мал этот участок.

На гладкой или покрытой невысокими холмами равнине тени подчеркивают рельеф только, если Солнце очень низко. Тогда его лучи почти скользят по поверхности земли, вызывая совершенно неожиданные сочетания света и тени. В миниатюре, хотя и в преувеличенном виде, это можно наблюдать на гладкой поверхности песка во время захода Солнца: каждый камешек, каждая неровность отбрасывают длинную тень — это напоминает фотографию лунного ландшафта и создает впечатление чего-то нереального.

## 250. Освещенность пейзажа в направлении к Солнцу и в противоположном направлении

Цвет и архитектура почти каждого пейзажа оказываются существенно различными в зависимости от того, смотрим ли мы по направлению к Солнцу или в противоположном направлении; меняется все впечатление от пейзажа! Пользуйтесь зеркалом, чтобы наблюдать в обоих направлениях одновременно.

1. Молодая нива, луг, поле люпина, капустное поле в направлении к Солнцу имеют желто-зеленый цвет, в направлении от Солнца они синеваты. Чтобы установить причину, исследуем «микроскопически» отдельный лист. Сорвем его и посмотрим на него сначала стоя лицом к Солнцу, а затем повернувшись в противоположном

*) Fr. Volz, Photographie und Wissenschaft 3, 8, 1954.

направлении. В первом случае мы увидим главным образом свет, проходящий сквозь лист, во втором — свет, отраженный от его поверхности (§ 248). Цвет и освещенность зависят иногда от направления ветра.

2. Волны на поле спелой ржи связаны главным образом с меняющимся видом колосьев. Предположим, что ветер дует по направлению к Солнцу: л и ц о м к С о л н ц у мы видим практически только яркие световые волны, они возникают, когда колосья наклонены к Солнцу так, что солнечный свет отражается к нашему глазу; с м о т р я о т С о л н ц а, мы видим несколько ярких, но гораздо больше темных волн. Последние возникают, когда, клонясь на ветру, колосья отбрасывают тень на соседние.

Это явление меняется в зависимости от направления ветра, направления взгляда, высоты Солнца.

3. Луг, на котором работает косилка, кажется гораздо более светлым, когда косилка движется от нас, чем когда она движется к нам. В первом случае мы видим значительно больше отраженного света (фотография XXIV; ср. § 248). Особенно силен контраст на стерне: здесь последовательные ряды в соответствии с движением машины оказываются попеременно светлыми и темными. Если вы повернетесь в противоположную сторону, светлые и темные полосы поменяются местами. Свежевспаханная земля блестит, если смотреть перпендикулярно к направлению еще влажных борозд.

4. Ряска в пруду ведет себя противоположно траве. В направлении от Солнца она желто-зеленая, к Солнцу — блеклая серо-зеленая. «Микроскопическое» исследование показывает, что в последнем случае неправильное отражение от поверхности гораздо сильнее. Мы не видим света, проходящего сквозь листья этого растения.

5. Пустошь, когда вереск отцвел, кажется темнее по направлению к Солнцу; в противоположном направлении она более блестящая, серебристая, светло-коричнево-серая, очевидно, благодаря отражению (фотография XXV).

6. Фруктовые деревья в цвету кажутся белыми только тогда, когда на них смотрят от Солнца. По направлению к Солнцу на фоне неба они кажутся черными (§ 246, 249).

7. Подобным же образом ветки и сучки деревьев оказываются серыми и коричневыми в направлении от Солнца и черными, без всяких деталей, по направлению к Солнцу.

8. Замощенная брусчаткой дорога коричнево-красная в направлении к Солнцу и бело-серая — от Солнца.

9. Покрытая гравием дорога бело-серая по направлению к Солнцу, коричнево-серая в противоположном направлении.

10. Морская пена в направлении от Солнца кажется ярко-белой; однако в направлении к Солнцу она значительно темнее, чем окружающие ее мириады отражений и всплесков играющей воды.

11. Неровная дорога, покрытая снегом, при взгляде на нее по направлению к Солнцу кажется в целом темнее, чем гладкий снег по сторонам; в направлении от Солнца — наоборот.

12. Если при ветре, дующем по направлению к Солнцу, смотреть на волны на озере, повернувшись к Солнцу спиной, вода кажется темно-синей с множеством черно-синих прожилок, расходящихся от точки наблюдения (соответствующих голубым участкам неба), каждая из многочисленных волн выступает самостоятельно. Если смотреть по направлению к Солнцу, все представляется жизнерадостным яркоголубым, а волны можно рассмотреть лишь на расстоянии.

13. Убедитесь, что когда вы смотрите по направлению к Солнцу, все предметы, тени которых обращены к вам, кажутся темными, но имеют красивые светлые края. В этом прелесть фотографий, снятых против света.

Эти и другие примеры дают в совокупности неисчерпаемые возможности для наблюдений. Объяснение всегда следует искать, наблюдая сначала картину в целом, а затем — отдельные предметы.

## 251. Как влажность влияет на цвета

*Верно, что сумеречная атмосфера «скрывает все предметы», но верно также и то, что Природа, никогда не оставляющая глаз человека без наслаждения, предусмотрела богатое вознаграждение. Цвета смягчаются из-за темноты, но они становятся ярче из-за влаги. Влажный предмет, какого бы он ни был цвета, в два раза ярче, чем сухой, и когда расстояния скрадываются дымкой, и яркие цвета исчезают с неба и последние лучи Солнца с земли,— на переднем плане появляются самые красивые оттенки, оживает совершенная зелень травы и листвы, и каждая освещенная Солнцем скала пылает агатом.*

*(Р е с к и н, Современные художники)*

Сама по себе влажность недостаточна для объяснения такого оживления света. Следует иметь в виду, что как только предметы покрываются тонкой пленкой воды, их поверхность становится более гладкой, они уже не рассеивают белый свет во все стороны, господствующим становится их собственный, более насыщенный цвет.

## 252. Пейзаж после дождя

После дождя весь пейзаж резко меняется. Не только контрасты неба, где тяжело нависшие облака сменяются просветлениями, создают особое настроение, но на наши чувства влияют блики, разбросанные по всему ландшафту. В этом принимают участие мокрые листья — кроны дубов или ивы над рекой, которые разбрасывают

вокруг световые пятна. Но весь этот блеск можно наблюдать только с той стороны, откуда светит Солнце, если к тому же его лучи падают под относительно малым углом.

Особенно привлекает наше внимание блеск мокрых опавших листьев, разбросанных по траве, если мы смотрим на них в направлении к Солнцу. Этот эффект убеждает нас в целесообразности метода, который применяли археологи при поисках кремневых орудий древнего человека: для того чтобы заметить осколки орудия, нужно идти в направлении от Солнца. В этом приеме учитывается особенность отражения света от поверхности кремня; в противоположность песку кремень отражает лучи света в определенном направлении.

Дождь полностью меняет цвета пейзажа. Уличный булыжник отражает тем сильнее, чем дальше он от нас и чем наклоннее падает на него наш взгляд. Удивительно, как хорошо отражает под большими углами не только асфальт, но и очень неровная мощеная дорога. Цвета песчаной, грунтовой и гравиевой дорог становятся темнее и теплее, первые капли дождя выступают темными пятнами. Почему? Вода проникает в каждую щель между зернами песка. От границы песчинка — вода свет отражается слабее, чем от границы песчинка — воздух. Луч света, который рассеялся бы в верхних слоях, теперь может проникнуть глубже, прежде чем он будет послан обратно к глазу, и на этом длинном пути он будет почти полностью поглощен.

Прекрасные цветовые оттенки показывает лужа воды на асфальтовой дороге: а) голубое небо, отраженное поверхностью воды; б) черный край там, где земля еще сыра; в) серый фон вокруг.

Водоросли в пруду образуют темно-зеленую волокнистую массу; часть, выступающая из воды, кажется более бледной из-за воздуха между волокнами. Но если, держа эту более бледную часть под водой, встряхнуть ее и сжать так, чтобы из нее вышли пузырьки воздуха, она станет темнее.

## 253. Силуэты

Мы называем силуэтом явление, при котором предметы на светлом фоне кажутся темными и обрисовываются как плоские фигуры. Подобный эффект можно достичь различными способами, из которых мы опишем здесь только некоторые.

1. Этот эффект можно наблюдать, когда дома и деревья вырисовываются на фоне вечерней зари, в то время, как с другой стороны, откуда мы ведем наблюдение, на предметы падает слабое освещение от уже потемневшего неба.

Главной причиной здесь является односторонность освещения в эти часы суток. Силуэты можно наблюдать и в середине дня, когда

все небо бывает покрыто плотными облаками, за исключением узкой полоски на горизонте, которая светится теплым оранжевым светом.

2. Их можно наблюдать ночью, когда фонари ярко освещают мостовую и когда между фонарем и нами вдруг промелькнет фигура прохожего. Парусная лодка иногда кажется нам удивительно черной на фоне моря, так освещенного Солнцем или Луной, что оно начинает сверкать подобно сплошной струе света.

3. Во время тумана или мелкого дождя как бы смываются все мелкие контрасты и остаются различимыми только крупные детали ландшафта, очертания которых бывают в общем довольно отчетливы. В такие моменты башни, дома, деревья становятся темно-серыми и четко вырисовываются на светло-сером фоне.

4. Ночью на фоне звездного неба огромные массивы ландшафта становятся еще более темными.

## 254. Человеческие фигуры в пейзаже

«Из моего окна я вижу обнаженного до пояса человека, работающего на полу в галерее. Когда я сравниваю цвет его кожи с цветом наружной стены, я замечаю как богато полутонами тело по сравнению с неживым материалом. Я заметил то же самое вчера на площади Святого Сульпиция, когда маленький мальчуган карабкался на залитую Солнцем статую фонтана. Его тело было тускло-оранжевым, переходы тени — фиолетовыми и отражения в затененной части, обращенной к Земле,— золотыми. Оранжевое и фиолетовое царили попеременно или пронизывали друг друга. Золотой цвет был несколько подкрашен зеленым. Настоящий цвет тела можно видеть только на Солнце и на открытом воздухе. Если человек высовывает голову в окно, она кажется совершенно другой, чем в комнате. Это показывает нелепость работы в студии, где каждый прилагает все силы, чтобы воспроизвести неверный цвет» (Delacroix, «Journal»).

## 255. Светляки

«Расскажи В., что я пересек Альпы и Апеннины, что я посетил «Jardin des Plantes», музей, основанный Бюффоном, Лувр с его сокровищами скульптуры и живописи, Люксембург с полотнами Рубенса; что я видел светляка!!! (Письмо Фарадея матери; Life and Letters, 1814).

Светляк принадлежит к отряду жуков. Самка светляка бескрыла и ползает, самец летает. В Голландии встречаются два типа светляков: *мелкий светлячок* (*Lampyris splendidula*); самка 9 *мм* длины, самец 8 *мм* длины, и *большой светляк* (*Lampyris noctiluca*): самец 11 *мм*, самка 16 *мм*. В СССР в средней полосе распространен большой светляк; его бескрылую самку обычно называют «Ивановым червячком». На юге встречается мелкий светлячок, а на Черноморском побережье Кавказа — *южный светляк* (*Luciola supuralis*), у которого светится летающий самец.

Светящиеся органы занимают последние два сегмента брюшка и содержат вещество, которое светится при окислении вследствие хемилюминесценции. Испускаемые лучи принадлежат к той области спектра, к которой наиболее чувствителен глаз. Инфракрасное излучение отсутствует. Таким образом, этого жука можно назвать действительно идеальным источником света — если бы только он светил несколько ярче!

## 256. Свечение моря

Свечение моря вызывается в нашей части света главным образом миллионами ночесветок (*Noctiluca miliaris*), которые рассеяны обычно по всему морю, но при определенных обстоятельствах, определяемых погодой, собираются в отдельных местах. Эти простейшие, принадлежащие к классу жгутиковых, имеют величину около 0,2 *мм*, т. е. как раз таковы, что невооруженный глаз различает их в виде мелких отдельных точек. Они излучают свет тогда, когда в воде растворен кислород, например при волнении. Кислород окисляет определенное вещество, не нагревая его сколько-нибудь заметно.

Этот свет имеет спектральный состав, совершенно непохожий на свет раскаленного тела; это не тепловое излучение, а *хемилюминесценция*. В этом излучении нет ни ультрафиолетовых, ни инфракрасных лучей, оно содержит лишь лучи, производящие наиболее сильное действие на наш глаз, в частности, желтые и зеленые.

Погрузив пальцы в море, вы ощутите легкое покалывание, если в воде находится большое число светящихся организмов. Пользуясь этим, вы можете днем предсказать, будет ли ночью наблюдаться свечение.

Свечение моря бывает великолепным в летние вечера перед грозой после жаркого дня. Сияние ламп вдоль набережной и свет из окон могут вызвать сомнение, наблюдается ли в действительности свечение моря или белая пена на гребнях волн; это явление по-настоящему красиво лишь в совершенно темные ночи. Если, однако, условия наблюдения не столь идеальны, лучше всего разуться, войти в воду и поболтать в ней руками.

Когда свечение выражено не столь ярко, во время волнения можно видеть множество блуждающих искр, на мгновение вспыхивающих тут и там и снова гаснущих. Наполните небольшое ведерко морской водой и поместите его в абсолютную темноту. Даже в наименее благоприятные дни вы увидите свечение, переливая воду в таз или возбуждая микроскопические существа добавлением в воду спирта, формалина или какой-либо кислоты. Налейте светящуюся воду в стакан, и светящиеся существа соберутся на ее поверхности. Постучите по стакану — сотрясение стакана заставит воду светиться. Если вы повторите это несколько раз, световое излучение будет становиться все слабее.

Иногда во время свечения морской воды мы не в состоянии различить искры. Тогда сияние связано с присутствием светящихся бактерий (*Micrococcus phosphoreus*).

Составьте шкалу для оценки свечения моря! Используйте холодный вечер, когда свечение определенно отсутствует и проследите за появлением пенистых гребней. В благоприятный для свечения вечер вы сможете подметить различие.

Если вы путешествуете по морю, особенно в тропиках, в темную ночь станьте на носу или на корме корабля так, чтобы на вас не падал свет. Вы увидите почти непрерывный поток искр, пролетающих мимо, он состоит из самых различных светящихся морских животных.

В Индийском океане временами все море кажется светящимся, в то время как система светящихся струй кажется вращающейся на его поверхности подобно спицам колеса: это ветровые волны и волны от носа корабля вовлекают воду в турбулентное движение и заставляют светиться.

## 257. Светящееся дерево, светящиеся листья

Иногда в темную летнюю ночь в сыром лесу можно видеть слабый свет гниющего дерева. Это свечение вызвано волокнами грибницы опенка (*Armillaria mellea*).

Весной или зимой попытайтесь найти древесный пень, с которого легко снимается кора с темными отделяющимися волокнами. Положите кусок этого пня во влажный мох и принесите домой. Держите его в затененном месте под стеклянным колпаком. Через несколько дней волокна грибка начнут светиться. Иногда светятся также и гниющие ветки; это свечение вызывается бактериями.

Сухие листья березы и дуба, скопившиеся толстым слоем и полураспавшиеся, явственно излучают свет на определенной стадии распада. Попытайтесь найти слой от 10 до 30 *см* толщиной; нас интересуют не свободно лежащие наверху листья, а более плотно спрессованные, с желто-белыми пятнами. Внесите горсть таких листьев в совершенно темную комнату. В этом случае свечение приписывают волокнам грибка, вид которого еще не установлен.

## 258. Кошачьи глаза ночью *)

Всем знаком сильный свет, который, как кажется, излучают глаза кошек. Однако в действительности этот свет предсгавляет собой отраженный, точнее, *направленно отраженный свет*, подобный свету фары велосипеда или нимбам на росистой траве (§ 185). Лучи, проникающие сквозь роговицу, образуют в глазу четкое изображение. Это изображение отражает свет так, что пучок лучей возвращается практически по тому же пути, по которому он проник в глаз. Чтобы видеть явление более отчетливо, оси глаза кошки и глаза наблюдателя должны располагаться на одной прямой. Этого можно достигнуть, держа электрическую лампу на уровне ваших глаз; свечение кошачьих глаз заметно тогда на расстоянии 80 *м*.

Свет, отраженный глазами собаки, становится красноватым. Глаза овец, кроликов и лошадей также светятся, но глаз человека этим свойством не обладают.

## 259. Отражение света во мху

Прекрасное ясное утро. Трава осыпана росинками. В затемненных сырых уголках — пушистые комки мха рода *Mnium*. На его нежных маленьких стебельках два ряда листочков, как бы обрызганных маленькими светящимися звездами. Они ровно и спокойно светятся золотисто-зеленым светом, в противоположность вспыхивающим каплям росы. Присмотревшись поближе, увидим, что ли-

*) Nature 88, 377, 1912.

сточки усыпаны мелкими каплями. Мы придем к заключению, что солнечный свет, пронизывающий края листьев, испытывает в каплях полное внутреннее отражение и еще раз, пройдя сквозь лист, выходит наружу, приобретая при этом золотисто-зеленый цвет. *Schistostega osmundacea*, знаменитый светящийся мох пещер и расщелин баварских Сосновых гор, еще красивее. У этого мха роль отражающих капель играют его шаровидные клетки.

### 260. Флуоресценция сока растений

Срежьте весной несколько кусков коры или несколько листьев конского каштана и поместите их в стакан с водой. Сок растения смешается с водой и появится голубое свечение. Его удобнее наблюдать, если при помощи увеличительного стекла (лупы или очкового стекла) пропустить сквозь жидкость пучок солнечных лучей. Это явление связано с тем, что жидкость поглощает фиолетовые и невидимые для нас ультрафиолетовые лучи Солнца, излучая в свою очередь голубой свет. Такого рода превращение света называют *флуоресценцией*.

Говорят, кора широко культивируемого ясеня белого (*Fraxinus ornus*) также обладает этим свойством; обычно его можно наблюдать только весной, но на молодых побегах можно видеть круглый год.

### 261. Свечение льда и снега

Старое предание говорит, что ледяные поля, после того, как их долго освещало Солнце, испускают ночью слабый свет. При нескольких градусах ниже нуля снег, говорят, также светится, если перед тем как его внесли в темную комнату, он был освещен Солнцем. Рассказывают, что градинам, особенно тем, что выпали первыми, свойственна своего рода электролюминесценция. Весьма вероятно, что здесь мы имеем дело с заблуждениями, и было бы интересно проверить их путем тщательных опытов.

### 262. Искры от камней

Иногда мы видим, как при ударе лошадиных подков о булыжник мостовой появляются искры.

Отыщите у дороги кремень или кварцит (т. е. обычную гальку). Это коричневатые камни, чуть просвечивающие у краев, обычно округлые, без кристаллической структуры. Ударьте два таких камня друг о друга в возможно более темном месте — появятся искры и специфический запах. Это наблюдается и у других камней. Искры представляют собой обломавшиеся частицы, нагретые при ударе до такой степени, что они начинают светиться. Запах объясняется тем, что при ударе освобождается некоторое количество газа.

## 263. Блуждающие огни *)

Народные сказания повествуют о блуждающих огнях, танцующих на кладбищах и заманивающих путников в болота. Их существование, однако, отнюдь не сказка. Их видел и описал знаменитый астроном Бессель и другие превосходные наблюдатели. Трудность в том, что это явление имеет множество различных форм.

Блуждающие огни появляются на болотах, в местах, где добывают торф, и вдоль канав; иногда их видят, когда утрамбовывают сырую свежеудобренную землю парников, или когда взбаламучивают грязную воду осушительных канав. Летом и дождливой теплой осенью они появляются чаще, чем в холодное время года. Они напоминают крошечное пламя, высотой от 1 до 12 *см* и шириной не более 4 *см*. Иногда они возникают непосредственно на земле, иногда же плывут приблизительно в 10 *см* над ней. Утверждение, что они «танцуют», по-видимому, неверно. В действительности они внезапно исчезают и в то же время рядом появляется другое пламя; это, вероятно, и создает впечатление быстрого движения. Иногда, прежде чем они погаснут, ветер успевает унести их на несколько десятков сантиметров. Во многих других случаях наблюдались блуждающие огни, горевшие без перерыва часами, в продолжение всей ночи и даже днем. В момент появления нового пламени временами слышен хлопок слабого взрыва. Цвет пламени иногда желтый, иногда красный или голубой. Во многих случаях, когда в пламя вносили руку, тепло не ощущалось. В других случаях пламя поджигало бумагу и вату. Запах обычно отсутствует, иногда ощущается слабый запах серы.

Какова же природа этого загадочного пламени? До сих пор никому не удалось собрать загорающийся газ. Предполагается, что это может быть фосфористый водород, который способен самопроизвольно загораться в воздухе; по-видимому, предположение о смеси $PH_3$ и $H_2S$, дающей огонь без дыма и запаха, ближе всего к действительности. Эти газы могут образовываться при распаде гниющих веществ. Само пламя — одна из форм хемилюминесценции.

Еще в 1910 г. д-ру Гаржанни удалось наблюдать множество блуждающих огней на болоте у Найкерка. Огни, величиной с камешек, сверкали между вереском и мхом. Но через несколько ночей, после сильного ливня, все исчезло.

Один читатель сообщил мне о блуждающих огнях, которые он наблюдал на болоте у Винтерсвайка. Впереди него кто-то шел, и вскоре он заметил огоньки, выходившие из-под земли в тех местах, где наступал впереди идущий человек. Огоньки были примерно 5 *см* высоты, вспыхивали голубоватым светом и тут же гасли.

*) W. Müllen-Erzbach, Abh. Naturwiss. Ver. Bremen **14**, 217, 1897; Wetter **20**, 46, 1903 и **33**, 18 и 71, 1916.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## 264. Несколько советов относительно фотографирования природных явлений

Каждое оптическое явление, описанное в этой книге, заставляет задуматься, нельзя ли его сфотографировать. Удивительно, как много можно сделать в этом направлении и как мало до сих пор сделано! Для фотографирования пригодна обычная камера. Если пользуются штативом, он должен быть снабжен штативной головкой. Явления, подобные радуге и гало, требуют широкоугольного объектива. Для фотографирования венцов и деформации заходящего Солнца нужна камера с фокусным расстоянием не меньше 30 *см*.

Пользуйтесь противоореольными пластинками или пленками преимущественно орто- или панхроматическими. Пейзаж со снегом, инеем, деревьями в цвету, облаками, горизонтом нужно снимать на орто- или панхроматических пластинках с желтым светофильтром. Чтобы лучи Солнца не попадали в объектив, пользуйтесь блендой.

Пейзажи лучше всего фотографировать, когда Солнце не слишком высоко. Отметьте различие, когда свет падает спереди, сзади, сверху (ср. § 250). Выдержка меняется от 1/100 *сек* для снимков с самолета до одного часа для снимков при лунном свете.

Проявляйте в метол-гидрохиноновом проявителе.

## 265. Как измерять углы

1. Попытайтесь оценить без каких-либо подсобных средств высоту звезды. Сначала попытайтесь найти зенит, затем повернитесь и посмотрите, располагается ли зенит на прежнем месте. После этого попытайтесь определить высоту в 45°, затем в 22°,5 и 67°,5. Вы обнаружите у себя стремление недостаточно запрокидывать голову назад (§ 125). У хорошего наблюдателя ошибка не превышает 3°.

2. Воткните три булавки $A$, $B$ и $C$ в дощечку или в открытку так, чтобы измеряемый угол был в точности заключен между лучами зрения $BA$ и $BC$. Дощечка должна быть неподвижной — или лежать на столе, или быть приколоченной к дереву. Затем прочертите линии $BA$ и $BC$ и определите величину угла при помощи транспортира.

3. Прикрепите к середине планки, в которую на равном расстоянии друг от друга вбиты гвозди или булавки, конец другой планки длиной 1 *м* так, чтобы планки были перпендикулярны (рис. 176, *а*). Получившиеся «грабли» держите так, чтобы конец $B$ был прижат к скуле. Тогда, если гвозди $A$ и $C$ совпадут с интересующими нас точками, искомый угол будет равен $AC$ радиан (один радиан — около 57°). Если, например, $AC = 7$ *см*, $AC/BA = 0{,}07$ *рад* $= 4°$. Для углов больше 20° точность определения уменьшается.

4. Вытяните перед собой руку, растопырив пальцы как можно шире. Угол, стягиваемый концами большого пальца и мизинца, составляет около 20°. Можно также, вытянув перед собой руку, держать в ней короткую планку перпендикулярно к тому направлению, в котором вы смотрите. Тогда, если видимое расстояние между двумя точками равно $a$ сантиметрам, угол между ними равен $a$ градусам.

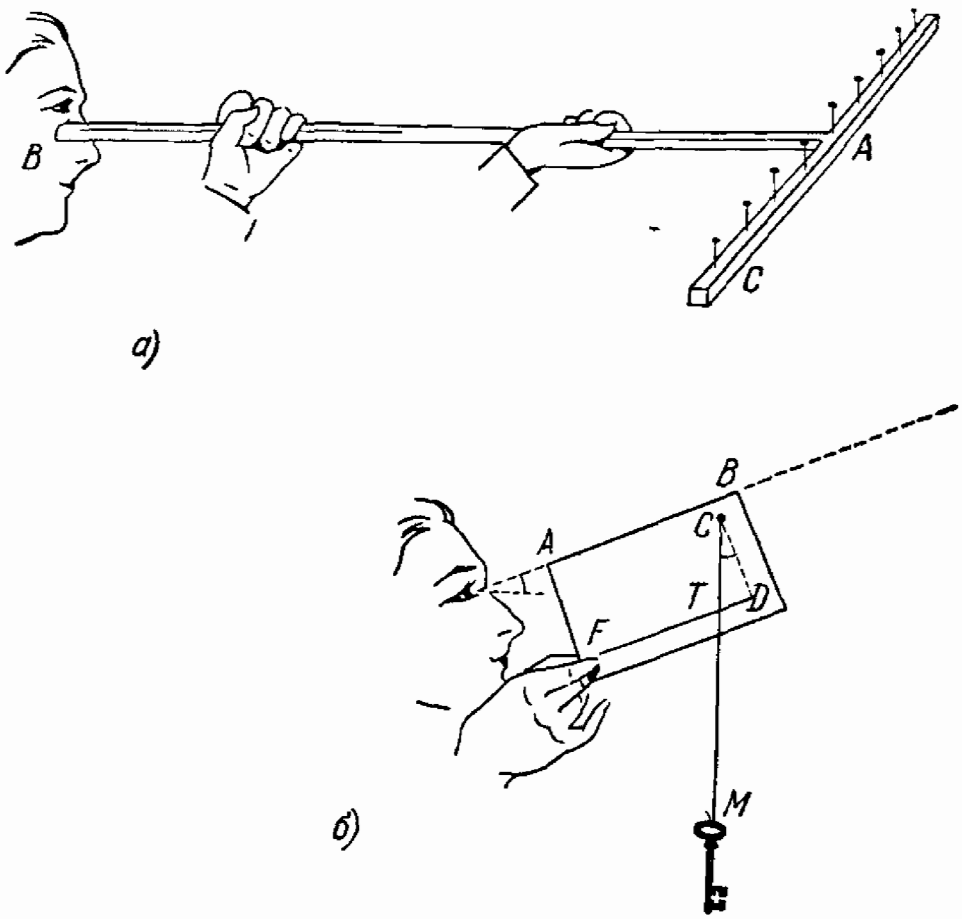



Рис. 176. Простые средства оценки углов.

Этот метод можно сделать более точным, измерив расстояние от планки до глаза.

5. Существует простое приспособление, позволяющее измерять высоту над горизонтом с точностью до 0°,5. Проколите прямоугольный кусок картона в точке $C$ и проденьте в $C$ нить, на конце которой подвешен груз, так что нить может служить в качестве отвеса (рис. 176, *б*). Наблюдатель смотрит вдоль $AB$ так, чтобы была видна, скажем, верхушка дерева, высоту которого он хочет измерить, отклоняя картонку от вертикали настолько, что нить висит свободно. Затем картонка наклоняется в противоположном направлении, так что нить прижимается к ней. На картонке прочерчиваются линии $CD$ перпендикулярно $AB$ и $DT$ параллельно $AB$. Угол $DCM$ равен тогда углу между $AB$ и горизонтальной плоскостью. Его можно измерить при помощи транспортира или вычислить по его тангенсу $TD/CD$. При малых углах $TD/CD$ равно углу в радианах. Если $CD = 10$ *см*, угол в радианах равен $TD(см)/10$.