

РАМИЗ АЛИЕВ

ЧТО
СЛУЧИЛОСЬ
С КЛИМАТОМ



Paulsen
Москва 2022

УДК 551.583

ББК 26.237

A50

Алиев, Рамиз

A50 Что случилось с климатом/ Р. Алиев. Москва : Паулсен, 2022. — 336 с. , ил.
ISBN 978-5-98797-247-2

В 2021 году в Глазго состоялась конференция ООН по климату. Уровень события, собравшего более 120 глав государств и правительств, подтверждает важность климатической проблемы для каждого жителя Земли. Дискуссии о климате становятся все более жаркими, и кажется, что разобраться в теме уже невозможно. Насколько в действительности велико наше влияние на климат планеты, какое место оно занимает среди других факторов, как и почему менялся климат в прошлом и чего нам ждать в будущем? Автору удалось сложные, стоящие на стыке наук понятия и теории изменения климата изложить популярно: для этого каждая глава книги содержит, кроме основного текста, три важных содержательных дополнения: введение в элементы климатической науки, основные понятия и весьма захватывающие истории про климат.

УДК 551.583

ББК 26.237

Обложка: © Zoonar.com/Khakimullin Aleksandr D9 / easy Fotostock / Фотобанк Лори

ISBN 978-5-98797-247-2

© Р. А. Алиев, 2022

© ООО «Паулсен», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора.....	7
ВВЕДЕНИЕ. Долгое странствие.....	9
ГЛАВА 1. Климат сегодня.....	15
1.1. Климат и погода. Изменения климата.....	17
1.2. Радиационный баланс Земли.....	22
1.3. Состав и строение атмосферы.....	24
1.4. Климатическая система.....	28
1.5. Циркуляция атмосферы.....	33
1.6. Океан в движении.....	36
1.7. Хаос в климатической системе: бабочка Лоренца против демона Лапласа.....	42
1.8. Почему климат меняется.....	48
<i>Истории про климат</i>	53
Украденный вельбот.....	53
Умереть за селитру.....	58
<i>Элементы климатической науки</i>	62
Фенологические ряды и исторические документы.....	62
Палеоклиматические архивы.....	64
<i>Подводим итоги</i>	68
<i>Основные понятия</i>	70
ГЛАВА 2. Климат в масштабе сотен тысяч лет.....	71
2.1. Всемирный потоп или ледниковый период?.....	73
2.2. Астрономическая теория оледенений.....	76
2.3. Доказательства астрономической теории.....	85
2.4. Ледниковые эпохи и геохимический цикл углерода.....	93
2.5. Почему тают ледники.....	99
2.6. Колебания тысячелетнего масштаба.....	102
2.7. Поздний дриас.....	108
<i>Истории про климат</i>	110
Легкая вода Гренландии.....	110
<i>Элементы климатической науки</i>	113
Разделение изотопов в природных процессах.....	113
Радиоуглеродный метод датирования.....	117
Зеленая Сахара.....	121
Радиоактивные элементы и палеоциркуляция.....	125
<i>Подводим итоги</i>	129
<i>Основные понятия</i>	130
ГЛАВА 3. Климат в масштабе миллиардов лет.....	131
3.1. От дрейфа континентов до тектоники плит.....	133
3.2. Тектоника плит и климат.....	144
3.3. Тектоника плит и углеродный цикл.....	148
3.4. Мир в цветочек.....	150
3.5. Великое похолодание: как менялся климат в кайнозойе.....	156
3.6. Лихорадка мирового масштаба: палеоцен-эоценовый термический максимум.....	163
3.7. День, когда наступил конец света.....	166
3.8. Время жить и время вымирать.....	175
3.9. Не только Чиксулуб: внезапные воздействия и их последствия.....	178
3.10. В ожидании астероида.....	187

<i>Истории про климат</i>	192
Великое тригонометрическое исследование	192
Блуждание полюсов или дрейф континентов?	194
Золото Атлантики	196
<i>Элементы климатической науки</i>	200
CO ₂ в атмосфере в прошлом Земли	200
Изогопные аномалии, связанные с радиоактивным распадом	201
Распространенность химических элементов в земной коре и метеоритах	203
Звезды и климат	206
Фракционирование изотопов серы и архейский океан внутри нас	208
<i>Подводим итоги</i>	212
<i>Основные понятия</i>	214
ГЛАВА 4. Климат в исторический период	215
4.1. Событие 8,2 К и неолитическая революция	217
4.2. Малый ледниковый период	221
4.3. Цикличность климата голоцена	227
4.4. Климат первого тысячелетия	230
4.5. Климат и солнечная активность	232
4.6. Климатические последствия извержений вулканов	239
4.7. Сброшенные с климатических качелей: резкие изменения климата и коллапс цивилизаций	244
<i>Истории про климат</i>	252
Люстры для Дворца Советов	252
<i>Элементы климатической науки</i>	255
Экспедиция в галерею	255
Мусор на перевале	256
Северо-Атлантическое колебание времен упадка Рима	257
<i>Подводим итоги</i>	259
<i>Основные понятия</i>	260
ГЛАВА 5. Климат антропоцена	261
5.1. Что такое антропоцен	263
5.2. Дебаты о климате	265
5.3. Откуда берется CO ₂ и что мы можем с этим сделать	267
5.4. Дорога в никуда	269
5.5. Как сократить выбросы	272
5.6. Энергия ядра	276
5.7. Цена электричества	281
5.8. Транспорт и выбросы CO ₂	282
5.9. Кем-то все равно пришлось бы пожертвовать	285
5.10. Операция «Попай»	287
5.11. План «Б»	289
<i>Элементы климатической науки</i>	293
Как запастись энергией	293
Могли ли земледельцы бронзового века спасти планету от оледенения	294
<i>Подводим итоги</i>	297
<i>Основные понятия</i>	298
ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Седьмое вымирание	299
<i>Благодарности</i>	304
<i>Литература</i>	305

Зое и Нине

ОТ АВТОРА

Прежде чем ступить в область окаменелостей, я представляю свои верительные грамоты геолога, упомянув для этой цели, что за годы моей разнообразной жизни был я и каменщиком, и отменным копальщиком канав, рвов и колодцев, винных погребов, подвалов и всевозможных водоемов¹.

Герман Мелвилл. Моби Дик, или Белый кит

Наверное, нужно рассказать, кто я и чем занимаюсь. И как случилось, что я написал эту книгу. Незнакомым людям я чаще всего представляюсь учителем химии, иначе слишком долго все объяснять. Отчасти это правда – несколько лет я преподавал радиохимию в МГУ. Главным плюсом преподавательской работы был длинный отпуск – я проводил его в горах с парашютом. В небе я пробыл несколько сотен часов – над береговыми скалами Восточного Крыма, над предгорьями Аннапурны, над Дауладаром и Атакамой.

Солнце, горы и преобладающий ветер создавали в небе невидимую сеть восходящих, нисходящих и горизонтальных воздушных течений. Своего рода воздушный замок с винтовыми лестницами и переходами, по которым можно было перемещаться на десятки километров без единой ложки керосина, на одной лишь энергии Солнца – энергии водорода, сгорающего в гелий. Встречались в этом замке и невидимые стены, и колодцы, в которые можно было ненароком угодить. Нашими проводниками в воздушном лабиринте были птицы – они помогали найти восходящие потоки. В Гималаях – грифы, в Македонии – аисты, над Донбассом – ласточки. Ласточек я встречал в двух километрах над землей, у самой нижней кромки облаков – они кормятся насекомыми, которых забрасывает вверх. Каждый день невидимый лабиринт выстраивался чуть по-иному: менялись сила и направление ветра, влажность воздуха, распределение температуры с высотой.

В горах восходящие потоки срываются с освещенных солнцем отрогов и почти всегда стоят над вершинами. Поднимаясь, воздух уносит стрекоз и бабочек, пух от растений и запахи земли: в Болгарии потоки пахли нагретой хвоей, в Икике, над чилийским побережьем – тухлой рыбой. По мере подъема воздух остывает и растут облака, порой нежные и воздушные, а иногда резко очерченные, похожие на гигантские башни. При конденсации влаги выделяется тепло, и от этого воздух поднимается еще быстрее.

Как-то раз меня засосало в облако. Появилось странное чувство: не было больше ни верха, ни низа; ни земли, ни неба; ни долины, ни гор, ничего не было. Был только я и безликая, потусторонняя сила, которая почти не ощущалась.

¹ Перевод И. Бернштейн.

Я бы и не знал, что меня продолжает тянуть вверх, если бы не звуковой сигнал и не мелькание цифр на экране прибора. Этот лифт шел без остановок, двери за мной захлопнулись. Все быстрее он уносил меня туда, где нет и не может быть жизни, потому что губы и ноздри покрываются иссиня-белой изморозью, а давление кислорода падает в пять раз. Я решил втянуть второй ряд строп, чтобы поскорее снизиться. Оказалось, это не так просто – руки быстро слабели и разжимались сами собой, крыло вырывалось. Я ждал, пока дома, поля и заводы не проступали из тумана, как на отпечатке в ванночке с проявителем, потом отпускал крыло, чтобы руки немного отдохнули. И картинка немедленно растворялась. И все повторялось заново. Кто кого перетянет – я облако или оно меня.

То, что мне удалось тогда сбросить высоту, – дело случая. Облако еще не достигло пика своего развития. Уйти от грозового облака было бы невозможно. После этого я стал читать все, что мне попадалось про облака. И вот что удалось узнать. В грозовом облаке средних размеров содержатся примерно 200 тыс. т воды. При ее конденсации выделяется такое же количество тепла, как и при взрыве шести атомных бомб вроде той, что сбросили на Хиросиму. Именно эта энергия и питает гигантский насос – вертикальная скорость потоков в облаке достигает десятков метров в секунду. Этого достаточно, чтобы оторвать крылья любому самолету. Эта же циклопическая сила приводит и к разделению положительных и отрицательных зарядов в облаке. Электрическая мощность облака достигает гигаватта – как у реактора чернобыльского типа. В грозовых разрядах могут происходить даже ядерные реакции.

Но больше всего меня поразило другое. Напряженность электрического поля в облаке недостаточна для возникновения молнии. Тут нужен особый пусковой механизм, резко понижающий электрическое сопротивление воздуха. По всей вероятности, эту роль играют галактические космические лучи – заряженные частицы сверхвысоких энергий. Они порождают в атмосфере множество элементарных частиц, ионизируя воздух и формируя канал, по которому проходит молния. Выходит, что наши земные грозы порождаются летящими в космосе частицами звезд, взорвавшихся миллионы лет назад.

Так благодаря облаку, давно растаявшему в небе над Сопотом, я попытался глубже вникнуть в суть процессов, протекающих в природе. И здесь мне очень помогли химическое образование и опыт полевой работы – как специалист в области радиоактивности окружающей среды я участвовал в одиннадцати морских экспедициях.

Так для меня постепенно приоткрывалась многоплановость мира, сложнейшая взаимосвязь и тонкая настройка процессов на всех уровнях – от атомного ядра и до человеческого общества. С тех пор я стараюсь не забывать, что мир устроен гармонично, и это знание, как ни странно, поддерживает меня уже немало лет.

ДОЛГОЕ СТРАНСТВИЕ

Если дорогой ты путника встретишь и путник тот спросит:
«Что за лопату несешь на блестящем плече, иноземец?» –
В землю весло водрузи – ты окончил свое роковое,
Долгое странствие¹.

Гомер. Одиссея

Караван британской экспедиции Джеймса Ричардсона двигался вглубь Сахары уже около 80 дней. С руководителем экспедиции были еще двое европейцев – доцент Берлинского университета географ Генрих Барт и астроном из Бонна Адольф Овервег. Как и другие подобные предприятия, экспедиция Ричардсона помимо научных задач имела также политические и коммерческие цели. Путешественники должны были разведать торговые пути от оазисов Сахары до городов на южной ее границе. Чтобы не вызывать раздражения у французов, владевших Северной Африкой, было решено придать экспедиции международный характер. Так в ней оказались двое ученых из Германии. Путешественники готовились тщательно: в их поклаже была даже разборная лодка, вызывавшая неизменные расспросы у жителей пустыни, – ею надеялись воспользоваться на озере Чад.

6 июня 1850 г. Барт, выбирая место для лагеря, обнаружил на камнях искусно выполненные изображения. На одном из них была антропоморфная фигура с рогатой головой (рис. 1), на другом – стадо быков на водопое. Странно, но на рисунках не было верблюдов, без которых жизнь в пустыне представить невозможно. Барт сделал вывод, что изображения «свидетельствуют об образе жизни, весьма отличном от того, что мы привыкли видеть сейчас в этих регионах» (Barth, 1857).

Странствие Барта затянулось более чем на пять лет. Оба его товарища умерли от неизвестной болезни, и (небывалый случай!) Форин-офис уполномочил немца Барта руководить британской экспедицией. Он пересек Сахару с севера на юг и обратно, исследовал обширные территории к югу от озера Чад, пройдя в общей сложности 20 тыс. км. Барт стал третьим европейцем, посетившим таинственный город Тимбукту,

¹ Перевод В. А. Жуковского.

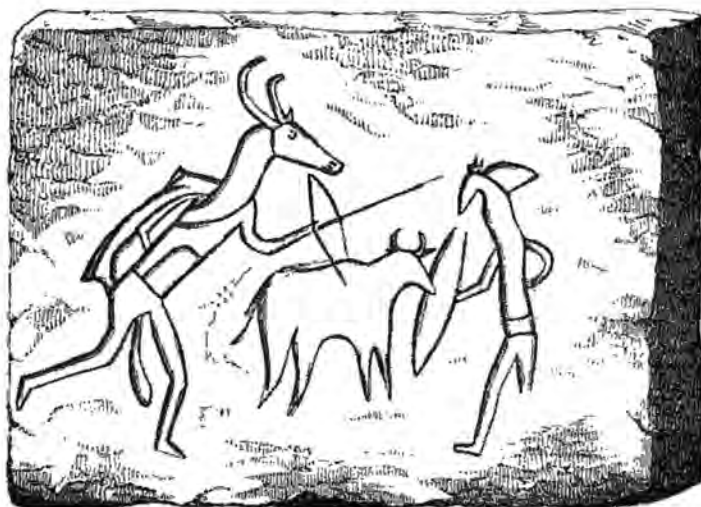


Рис. 1. Рисунок из книги Барта (Barth, 1857, p. 197)

и вторым, кто вернулся оттуда живым². Он составил первые карты Сахары и Сахеля, исследовал культуру и языки местных жителей. Вестей от Барта не было так долго, что «Таймс» сообщила о его смерти (Prothero, 1958). Возвращение в Европу стало для него горьким разочарованием. Многочисленные открытия в географии и антропологии не принесли ему ни славы, ни богатства. Его «прокатили» на выборах в Прусскую академию наук, и он так и не дождался профессорской кафедры в Берлинском университете. Имя его почти забыто³.

Нехватка знаний о территориях, расположенных к западу от Нила, восполнялась слухами и легендами о затерянных в песках оазисах; часть из них восходит к «Истории» Геродота. Особое место среди этих историй занимала легенда об оазисе Зерзура, который упоминается в арабском руководстве для искателей сокровищ XV в., «Книге скрытых жемчужин». Зерзура предстает в ней как белый город в пустыне, с пальмовыми и оливковыми рощами, наполненный несметными богатствами. В начале 1930-х годов Зерзура становится постоянной темой «Географического журнала» – основного издания Королевского

² Благодаря своему географическому положению на берегу реки Нигер и на южном краю Сахары Тимбукту играл важную роль как центр транссахарской торговли. В Средние века город стал также важным духовным центром ислама. Первым из европейцев Тимбукту посетил шотландец Александр Ленг в 1826 г. Однако он был убит вскоре после того, как покинул город. Через два года до Тимбукту добрался француз Рене Кайе. Город его не впечатлил: «У меня было иное представление о величии и богатстве Тимбукту. На первый взгляд город представлял лишь множество ветхих домов, построенных из земли». Кайе удалось вернуться домой и получить награду, обещанную Французским географическим обществом за достоверную информацию о Тимбукту.

³ К счастью, его биография издана на русском языке (Геншорек, 1985).

географического общества. В 1929 г. группа исследователей, в основном британских офицеров и колониальных чиновников, основала клуб «Зерзура» в пабе в Вади-Халфе, Судан. Это был закрытый джентельменский клуб, членов которого объединяли поиски таинственного оазиса.

В начале 1930-х годов к клубу искателей Зерзуры присоединился венгерский граф Ласло Алмаши (1895–1951), летчик-ас Первой мировой, путешественник и немецкий разведчик. Его бурная биография легла в основу романа Майкла Ондатже и одноименного фильма «Английский пациент». Алмаши учился на инженера в Лондоне. Автомобиль он водил с 10 лет, а в 17 получил лицензию пилота. В 1929 г. Алмаши путешествовал по Восточной Африке, Судану и Египту как представитель австрийской автомобильной фирмы. С появлением автомобилей и самолетов стало возможно исследовать территории, ранее недостижимые для караванов. В 1932 г. участники экспедиции с воздуха заметили зеленую долину, которую приняли за Зерзуру. Через год, обследуя одну из долин на западной стороне плато Гильф-эль-Кебир, Алмаши нашел небольшую пещеру. На стенах ее были изображены антилопы, жирафы и, самое удивительное, фигуры плывущих (а может, тонущих?) людей. Этого меньше всего можно было ожидать в пустыне. Алмаши сделал тот же вывод, что и Барт: Сахара не всегда была безводной. Сейчас мы знаем, что около 7 тыс. лет назад, когда были изображены фигуры пловцов (Riemer et al., 2017), Сахара была саванной. Из гигантских озер той эпохи до наших дней сохранилось лишь озеро Чад,



Рис. 2. Алжирская почтовая марка. Таинственный объект в правой части рисунка, по-видимому, пресноводная медуза (Dumont, 2017). Из коллекции автора

которое 7 тыс. лет назад было размером с Каспийское море. И недавно выявленное наскальное изображение пресноводной медузы в центральной Сахаре уже не кажется столь фантастическим (Dupont, 2017). Оно было известно на протяжении десятилетий и в 1981 г. даже попало на алжирскую почтовую марку (рис. 2). Но видели в нем что угодно, только не медузу. И действительно – откуда ей взяться в Сахаре?

Теперь известно, что с периодичностью в 22 тыс. лет, подчиняясь циклам прецессии земной оси⁴, в Сахаре устанавливается влажный климат. Около 10 тыс. лет назад летняя инсоляция Северной Африки была выше примерно на 7 %. Это приводило к большему контрасту температур между сушей и океаном и усиливало летний муссон.

Периоды «зеленой Сахары» сыграли важную роль в истории человечества. Биологический вид *Homo sapiens* возник в Восточной Африке примерно 200–150 тыс. лет назад. Однако расселению людей за пределы первоначального ареала препятствовали пески Сахары, Аравии и Леванта. Судя по археологическим находкам и генетическим исследованиям, люди мигрировали из Африки и расселялись по планете волнами (рис. 3). Сначала они заселили Аравию и Левант (120–90 тыс. л. н.), около 50 тыс. лет назад люди появились в Австралии, а примерно на 5 тыс. лет позже – в Западной Европе (De Menocal, Stringer, 2016). Реконструкция климатов прошлого (Timmermann, Friedrich, 2016) приводит к выводу, что несколько раз в течение последнего ледникового цикла открывался «зеленый коридор» через Аравию и Левант. Периоды, благоприятные для миграции, были 106–94, 89–73, 59–47 и 45–29 тыс. лет назад⁵. Так человеческие волны управлялись климатическими факторами, а они, в свою очередь, – влиянием тяготения небесных тел на движение Земли по орбите. Эти же астрономические факторы задавали темп оледенений, а значит, и колебаний уровня моря. Мелководный

⁴Подробнее об этом см. главу 3.

⁵В этой книге часто будет идти речь о временных рамках тех или иных событий. Как указывать промежутки времени и что брать за начало отсчета временной шкалы? Вопрос не столь очевидный, как кажется. В нашей повседневной жизни мы привыкли использовать отсчет времени от Рождества Христова. Впрочем, дата эта была вычислена в VI в. монахом Дионисием Малым, по-видимому, с ошибкой в несколько лет. По мнению многих современных историков, Иисус Христос родился в 5 г. до Р. Х., как бы странно это ни звучало. В научной литературе чаще используют религиозно нейтральный синоним «наша эра». Но такой отсчет времени удобен лишь для относительно недавних событий, произошедших не более нескольких тысячелетий назад. Летоисчисление от Р. Х. используют историки и археологи, но палеонтологам, геологам и палеоклиматологам оно неудобно. Они чаще говорят о том, что то или иное событие произошло столько-то лет назад. В англоязычной литературе этому соответствует обозначение BP – before present, то есть до настоящего времени. Когда мы указываем промежуток времени, не важно, идет ли речь о летоисчислении от Р. Х. или до настоящего времени, мы указываем даты слева направо, то есть от начала промежутка к концу, например 200–150 тыс. лет назад, или 356–323 гг. до н. э., или 1799–1837 от Р. Х.

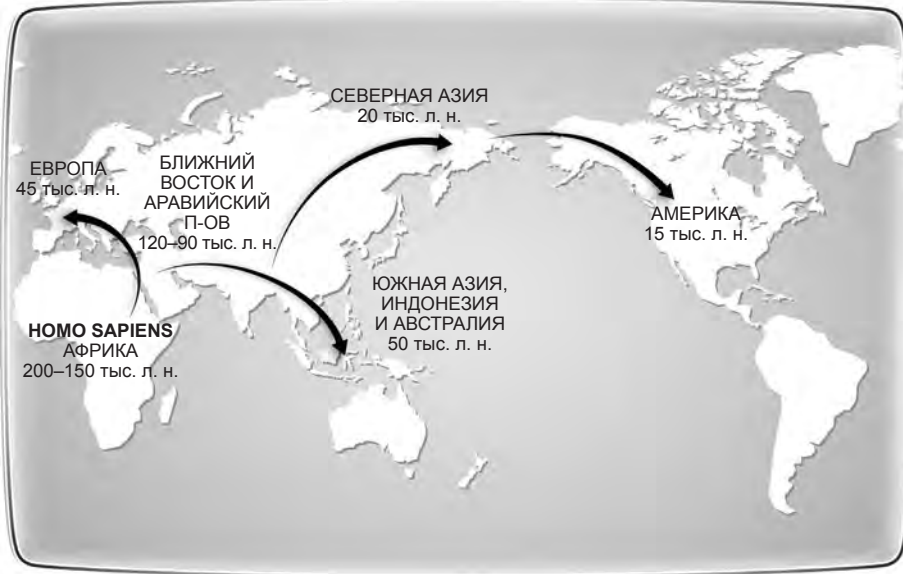


Рис. 3. Расселение *Homo Sapiens* по планете (De Menocal, Stringer, 2016)

Берингов пролив в ледниковые эпохи превращался в сухопутный мост, по которому и люди, и животные свободно перемещались между Азией и Америкой. Так произошло заселение Америк около 15 тыс. лет назад – вскоре после максимума последнего оледенения (Goebel et al., 2008).

Исход из Африки – лишь один из примеров того, как климат задавал темп и направление развития цивилизации. Из сравнительно недавних примеров можно упомянуть становление испанской и португальской колониальных империй. Их успех во многом был предопределен удачным расположением, наличием удобных промежуточных баз – архипелагов в Северной Атлантике (Азоры, Канары, Кабо-Верде). Но главной составляющей успеха были пассаты, приводившие в движение корабли. Путешествия испанцев и португальцев начинались в субтропиках, ближе к пассатной зоне, где ветра дуют от берегов Европы к Америке. Напротив, в умеренных широтах господствует западный перенос, то есть ветра дуют преимущественно от Америки к Европе, что препятствовало плаваниям англичан и голландцев (Bankoff, 2017).

Длительность существования нашей цивилизации ничтожна в сравнении с возрастом Земли. Оно полностью укладывается в **голоцен** – последнее межледниковье, начавшееся 11,7 тыс. лет назад. По счастью, голоцен отличается относительной стабильностью условий, однако региональные изменения температуры и влажности были порой достаточно сильными, чтобы сыграть решающую роль в подъеме и упадке древних

сообществ. Так, возможной причиной упадка цивилизации майя стала затяжная засуха в IX–XI вв. (Douglas et al., 2016a; Luzzadder-Beach et al., 2016). Другой хрестоматийный пример воздействия климатических факторов на ход истории – коллапс некогда процветавших поселений викингов в Гренландии (Barlow et al., 1997; Arneborg et al., 1999; Lynnerup, Nørby 2004; Dugmore et al., 2012), связанный с наступлением малого ледникового периода. В иных случаях причиной кризиса становились разного рода природные катастрофы. Извержения вулканов, землетрясения и цунами порой приводили к гибели городов и смене царствующих династий. Считается, что извержение вулкана Санторин около 1600 г. до н. э. (Friedrich, 2006) и последовавшее за ним цунами (Bruins et al., 2008) стали причиной упадка минойской цивилизации. Сильнейшее извержение вулкана Уайнапутина в Перу 19 февраля 1600 г. привело к уменьшению притока солнечной радиации к земной поверхности, так как ее задерживал вулканический аэрозоль. В результате заметно похолодало (De Silva, Zielinski, 1998; Verosub, Lippman, 2008; Fei et al., 2016). С этим извержением иногда связывают три неурожайных года в России (1601–1603), ставшие причиной Смутного времени (Verosub, Lippman, 2008).

Итак, история человечества неразрывно переплетена с историей климата. Чтобы заглянуть в будущее, нам необходимо понять механизмы, управляющие климатом. Это сделать невозможно, оставаясь в рамках современности, не разобравшись с историей развития нашей планеты. Чем глубже мы погружаемся в прошлое, тем меньше мы о нем знаем. В этой книге мы в основном ограничимся рамками нашей геологической эры – кайнозоя. Как правило, этого достаточно, чтобы кратко обрисовать основные факторы, воздействующие на климат. Некоторым из них – орбитальному влиянию, тектонике плит, солнечной активности, катастрофическим столкновениям с космическими телами – в книге посвящены отдельные главы.

Расселившись по планете, человечество вскоре перестало быть пассивной частью биосферы. Воздействие человека на природу началось еще с неолита – с переходом от кочевого образа жизни к оседлому. С тех пор человек активно преобразует планету, выжигая и вырубая леса, распахивая землю, все активнее потребляя водные и минеральные ресурсы, вмешиваясь в геохимические циклы. Не исключено, что наибольшую и при этом наименее осознаваемую угрозу несет именно антропогенное воздействие на климат, связанное с изменением состава атмосферы. Антропогенному влиянию на климат посвящена последняя глава книги. Куда нас оно приведет – сказать трудно, ибо воздействие человека на природную среду определяется не законами термодинамики или небесной механики, а развитием технологий, политических систем и общественного сознания.

ГЛАВА 1

КЛИМАТ СЕГОДНЯ

Освежив горячее тело
Благовонной ночью тьмой,
Вновь берется земля за дело
Непонятное ей самой.

Николай Гумилев. Поэма начала

Земля получает энергию от Солнца. Климат формируется в результате взаимодействия атмосферы, океана, суши, льдов и живой природы. Он непрерывно меняется под влиянием множества факторов, действующих в разных масштабах времени – от десятилетий до миллиардов лет. Об изменениях климата мы можем судить по прямым наблюдениям, исследованиям исторических документов и природных объектов.

1.1. Климат и погода. Изменения климата

Разговоры о погоде станут интересными при первых признаках конца света.

Станислав Ежи Лец, Непричесанные мысли

В слово «погода» каждый из нас вкладывает свой смысл. Для городского жителя это в первую очередь температура воздуха и осадки. Его интерес к погоде сводится к вопросу, надеть ли шапку и брать ли зонтик. Прочные стены домов, городской транспорт, связь, надежное снабжение электричеством и водой – все это резко ослабляет нашу зависимость от природных факторов. Для человека, путешествующего пешком, для крестьянина или жителя гор погода – фактор, во многом определяющий его повседневность. А для рыбака из Пури в индийском штате Орисса или парашютиста в болгарском Сопоте погода – вопрос жизни и смерти. И пилота будут волновать такие ее особенности, как сила и направление ветра на разных высотах, форма облаков, высота слоя инверсии и нулевой изотермы. От этого зависит, ждать ли в воздухе сильной турбулентности и стоит ли опасаться грозы.

Однако для всех нас погода – нечто сиюминутное. Когда мы говорим о погоде, речь обычно идет о часах или об одном, максимум о нескольких днях. К тому же погода – понятие локальное, ограниченное в пространстве несколькими километрами вокруг наблюдателя.

Погоду мы воспринимаем эмоционально, она бывает «хорошая», «отличная», «славная», «превосходная», «ужасная», «скверная», «дурная», «злая» – таковы результаты поиска в Национальном корпусе русского языка.

Когда мы говорим о климате какой-либо местности, мы имеем в виду средние значения основных погодных параметров, таких как температура и давление воздуха, влажность, сила и направление ветра. В конкретный год параметры могут существенно отличаться от средних. Жители Москвы хорошо помнят аномально жаркое лето 2010 г., когда воздух стал непрозрачным от лесных пожаров, или морозную зиму 2005/06 г. Кому-то запомнилось холодное лето 2019-го или почти бесснежная зима 2019/2020 г. Но такие вариации еще не свидетельствуют

об изменениях климата. Для того чтобы выявить какую-либо закономерность, нужно задать время, за которое проводится усреднение годовых данных. Всемирная метеорологическая организация рекомендует период в 30 лет.

Пока речь идет о локальном климате, более или менее понятно, что мы имеем в виду. Когда мы рассматриваем планету в целом, эта ясность исчезает. Тут волей-неволей приходится жертвовать деталями и оперировать абстрактными, не измеряемыми непосредственно величинами, такими как средняя по планете среднегодовая температура приземного воздуха или средняя температура поверхности или глубинных вод океана.

Согласно независимым наблюдениям целого ряда вполне уважаемых организаций средняя температура¹ нашей планеты выросла за последние сто лет примерно на 1 °С. Если эти цифры не убеждают или оставляют сомнения в том, как они получены, можно посмотреть на фотографии ледников, сделанные в разных частях Земли с одного и того же ракурса в начале XX в. и сейчас, – их легко в изобилии найти в Интернете. Глобальное потепление – реальность, в которой мы живем, по крайней мере, с конца 1970-х годов (рис. 1.1).

С ростом глобальной температуры тают ледники суши, а значит, растет уровень океана, со скоростью примерно 1,8 мм/год. Кроме того, примерно на 2,7 % за десятилетие сокращается площадь морских льдов в Арктике (рис. 1.2).

Рисунок 1.1 неизбежно вызывает ряд вопросов. Много это или мало – 1 °С за столетие? Менялся ли климат до 1880 г.? Каков был масштаб колебаний температуры в историческую эпоху? А за время существования вида *Homo sapiens*? А за время существования планеты? И главное: чего нам ждать в ближайшем будущем? Для ответа на любой из этих вопросов нам нужна информация о климате прошлого.

Первая попытка систематических метеонаблюдений была предпринята в 1654 г. великим герцогом Тосканским Фердинандо II Медичи, однако основанная им сеть из девяти станций просуществовала лишь 13 лет и полученные данные не были использованы. Интенсивное развитие синоптической² метеорологии пришлось на середину XIX в. Отчасти этому способствовала Крымская война. 14 ноября 1854 г. сильнейший шторм разбил о скалы десятки британских и французских

¹ В дальнейшем не будем каждый раз повторять «усредненная по планете среднегодовая температура поверхностного слоя воздуха над сушей и океаном».

² Слово *синоптический* происходит от греческих *syn* – вместе, и *optomai* – вижу. Синоптическая метеорология основана на одновременном наблюдении параметров погоды в разных местах. Эти данные наносятся на синоптические карты и служат основой для прогнозирования погоды.

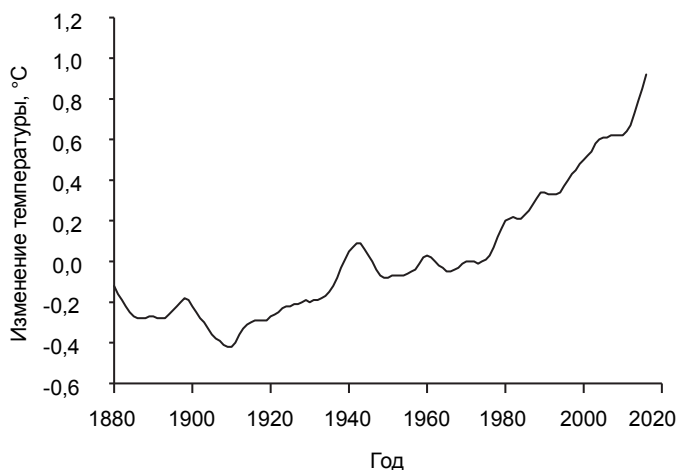


Рис. 1.1. Изменение среднегодовой температуры по данным NASA (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>). Изменение отсчитывается от среднего за период 1951–1980 гг.

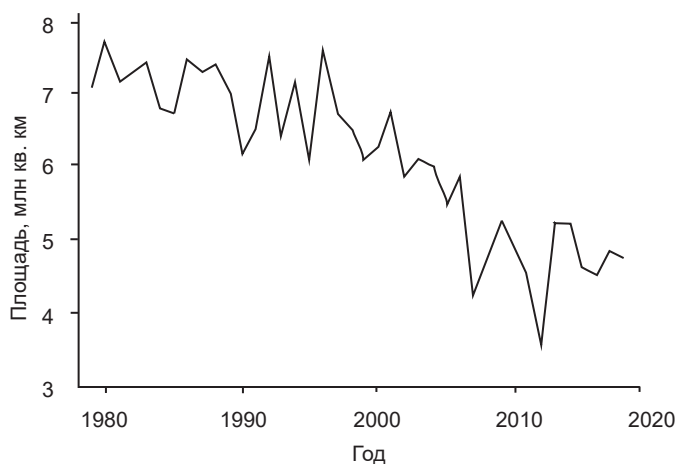


Рис. 1.2. Изменение площади морских льдов в Арктике в 1979–2018 гг. (сентябрь) (National Snow, Ice Data Center <https://nsidc.org>)

кораблей, стоявших на внешнем рейде Балаклавы. Тогда погиб и пароход «Принц» – по слухам, с грузом золота. Из 150 человек команды спаслось лишь шестеро. Впоследствии история этого корабля обросла легендами. Под именем «Черный Принц» он упоминается в «Листригонах» Куприна, стихотворении Бродского «Новый Жюль Верн» («Капитан, в этих местах затонул “Черный Принц” при невыясненных обстоятельствах»), ему посвящена одноименная поэма Николая Асеева.

Впрочем, история корабля, груженного золотом, будоражила воображение не одних лишь поэтов. В 1923 г. по приказу Генриха Ягоды для подъема «Принца» была создана Экспедиция подводных работ особого назначения (ЭПРОН) при ГПУ; правда, найти «Принца» и мифическое золото так и не удалось.

В тот же шторм, когда погиб «Принц», французы потеряли «Генриха IV». После этого французское правительство обратилось к директору Парижской обсерватории Урбену Леверье (он еще появится на страницах этой книги) с просьбой прояснить обстоятельства развития балаклавского шторма. Для математика уровня Леверье это не было сложной задачей. Он запросил европейских метеорологов, выяснил, что шторм зародился за несколько дней до трагедии и, прежде чем дойти до Балаклавской бухты, пересек все Черное море. Стало ясно, что, будь в распоряжении моряков оперативные сводки погоды, беды бы не случилось. Леверье доложил французскому правительству о необходимости создать сеть метеорологических станций, данные с которых с помощью телеграфа должны были оперативно поступать в Париж. В 1856 г. план Леверье был реализован – во Франции появилась служба погоды. А после окончания Крымской войны в 1857 г. служба погоды стала международной.

Одной из первых национальных метеослужб стал британский метеорологический департамент, созданный в 1854 г. при Министерстве торговли. Его возглавил адмирал Роберт Фицрой (рис. 1.3). Толчком к развитию синоптической метеорологии стала трагедия. 26 октября 1859 г. клипер «Роял Чартер», завершавший двухмесячный рейс из Мельбурна в Ливерпуль, попал в двенадцатибалльный шторм и разбился о скалы неподалеку от порта назначения. Катастрофа унесла 459 жизней. Большую часть пассажиров составляли рабочие австралийских золотых приисков. Возможно, если бы не золото, жертв было бы меньше – у некоторых пассажиров тяжелые куски драгоценного металла были вшиты в одежду. На месте кораблекрушения дайверы до сих пор находят золотые самородки. Гибель одного из самых быстроходных судов, оснащенного, помимо парусного вооружения, паровыми двигателями, произвела мрачное впечатление на британское общество. Чтобы предотвратить подобные трагедии, Фицрой создал сеть наблюдательных станций на побережье, связанных телеграфом. Они должны были предупреждать моряков о надвигающейся буре (Burton, 1986).

В России в 1849 г. по указу царя Николая I была создана Главная физическая обсерватория. Ежедневный выпуск бюллетеней погоды она начала с 1872 г.



Рис. 1.3. Роберт Фицрой (1805–1865). Капитан знаменитого «Бигля», вице-адмирал Королевского флота, губернатор Новой Зеландии, основатель практической метеорологии. Фото сделано ок. 1860 г.

Итак, мы располагаем непрерывными метеонаблюдениями примерно за полтора века. Причем их трудно назвать исчерпывающими как по количеству параметров, так и по географическому охвату. Ситуация значительно улучшилась с началом космической эры, когда появилась возможность со спутников непрерывно контролировать площадь облаков, размеры ледников, температуру поверхности океана, содержание хлорофилла в морской воде и т. д. Как же узнать о том, что было 200, 300 и более лет тому назад? Ведь без этого невозможно оценить масштаб нынешних климатических изменений и выяснить их причины. Отчасти в этом нам могут помочь исторические документы. Информацию о климате более далекого прошлого можно получить по косвенным данным, исследуя осадочные породы, донные отложения, ледники. Подробнее об этом см. раздел «Элементы климатической науки» в данной главе.

1.2. Радиационный баланс Земли

Изучение климата планеты естественно начать с ее энергетического баланса. Земля получает энергию от Солнца. Тепловой поток из недр Земли невелик, от сотых до десятых долей ватта на квадратный метр. Составляя тепловой баланс, им можно пренебречь; это же касается и космического излучения.

Любое тело является источником электромагнитного теплового излучения. Оно возникает из-за движения атомов и молекул. Длина волны, при которой поток теплового излучения максимален, обратно пропорциональна температуре тела (так называемый закон смещения Вина). То есть чем горячее тело, тем выше энергия теплового излучения. Так, человеческое тело температурой $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ излучает в инфракрасном диапазоне с максимумом длины волны около $10\text{ }\mu\text{m}$. Именно это позволяет наблюдать людей с помощью приборов ночного видения. Тела с более высокой температурой, например раскаленная лава или лампочка накаливания, излучают в видимом диапазоне. Температура нити накаливания лампочки существенно ниже температуры фотосферы Солнца, потому излучение ее сдвинуто в красную область спектра в сравнении с дневным светом.

Солнечный спектр на границе атмосферы близок к спектру тела с температурой $5250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мощность солнечного излучения в пересчете на 1 м^2 на верхней границе атмосферы примерно соответствует мощности электрического чайника (1361 Вт/м^2) (Корр, Leap, 2011). Эту величину называют **солнечной постоянной**, хотя название вводит в заблуждение – поведение Солнца не столь уж постоянно (об этом – в главе 4). Площадь поперечного сечения планеты в четыре раза меньше площади ее поверхности (πR^2 и $4\pi R^2$ соответственно). Если пересчитать энергию, приходящую от Солнца, на всю поверхность планеты, получится около 340 Вт/м^2 .

Около 30 % солнечной энергии отражается облаками, поверхностью Земли и рассеивается атмосферой обратно в космос. Остальные 70 % передаются климатической системе планеты. Примерно треть этой величины поглощается озоном и водяным паром, капельками воды в облаках и частицами пыли, нагревая атмосферу (рис. 1.4), а две трети – поверхностью Земли. Эта энергия передается атмосфере путем конвекции, затрачивается на испарение воды (скрытое тепло) и испускается в виде теплового излучения в инфракрасном диапазоне. Упрощенная картина радиационного баланса поверхности Земли, ее атмосферы и планеты в целом представлена на рис. 1.4.

Мы знаем, сколько энергии Земля получает от Солнца ($0,7 \cdot 340 = 238\text{ Вт/м}^2$). Любой бюджет должен быть сбалансирован – это необходимо



Рис. 1.4. Радиационный баланс Земли. Подробнее см. (Kiehl, Trenberth, 1997)

для поддержания постоянных условий, в нашем случае – для сохранения постоянной температуры. Значит, столько же энергии Земля отдает в космическое пространство в виде длинноволнового излучения. Зная поток излучения, можно рассчитать³ среднюю температуру земной поверхности. Расчет дает величину минус $19\text{ }^{\circ}\text{C}$. В действительности же температура гораздо выше, около $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это происходит оттого, что атмосфера, подобно одеялу, задерживает тепло Земли. Она пропускает коротковолновое излучение Солнца внутрь и не выпускает длинноволновое излучение Земли наружу. Поглощая длинноволновое излучение, атмосфера, переизлучает его во всех направлениях, в том числе и в обратном. Это естественное явление называется **парниковым эффектом**. Поглощают инфракрасное излучение в основном водяной пар и углекислый газ, в меньшей степени – озон, метан, закись азота. Газы, молекулы которых состоят из двух одинаковых атомов, в том числе основные компоненты атмосферы (N_2 , O_2), прозрачны для инфракрасного излучения. На Венере, где атмосфера в 93 раза плотнее земной и состоит почти полностью из углекислого газа, температура благодаря парниковому эффекту достигает почти $500\text{ }^{\circ}\text{C}$!

³ Согласно закону Стефана – Больцмана мощность теплового излучения (во всей области спектра) пропорциональна четвертой степени температуры. Это соотношение позволяет рассчитать температуру, зная поток теплового излучения. Теория теплового излучения стала одним из важнейших достижений физики конца XIX в. и в итоге привела к рождению квантовой механики.