



РАМИЗ АЛИЕВ

**ЧТО
случилось
С КЛИМАТОМ**

Рамиз Алиев

Что случилось с климатом

«Паулсен»

2022

УДК 551.583
ББК 26.237

Алиев Р. А.

Что случилось с климатом / Р. А. Алиев — «Паулсен», 2022

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. В формате PDF A4 сохранен издательский макет.

УДК 551.583
ББК 26.237

ISBN 978-5-98797-247-2

© Алиев Р. А., 2022
© Паулсен, 2022

Содержание

От автора	6
Введение	8
Глава 1	13
1.1. Климат и погода. Изменения климата	14
1.2. Радиационный баланс Земли	19
1.3. Состав и строение атмосферы	21
1.4. Климатическая система	25
1.5. Циркуляция атмосферы	31
1.6. Океан в движении	34
1.7. Хаос в климатической системе: бабочка Лоренца против демона Лапласа	40
Конец ознакомительного фрагмента.	45

Рамиз Алиев
Что случилось с климатом
Зое и Нине

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

© Р. А. Алиев, 2022

© ООО «Паулсен», 2022

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 наверх. 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. 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

¹ Перевод И. Бернштейн.

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.

Введение

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 странствие².*

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, и вторым, кто вернулся оттуда живым³. 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 «прокатали» на выборах в Прусскую академию наук, и он так и не дождался профессорской кафедры в Берлинском университете. Имя его почти забыто⁴.

² Перевод В. А. Жуковского.

³ 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.

⁴ К счастью, его биография издана на русском языке (Геншорек, 1985).

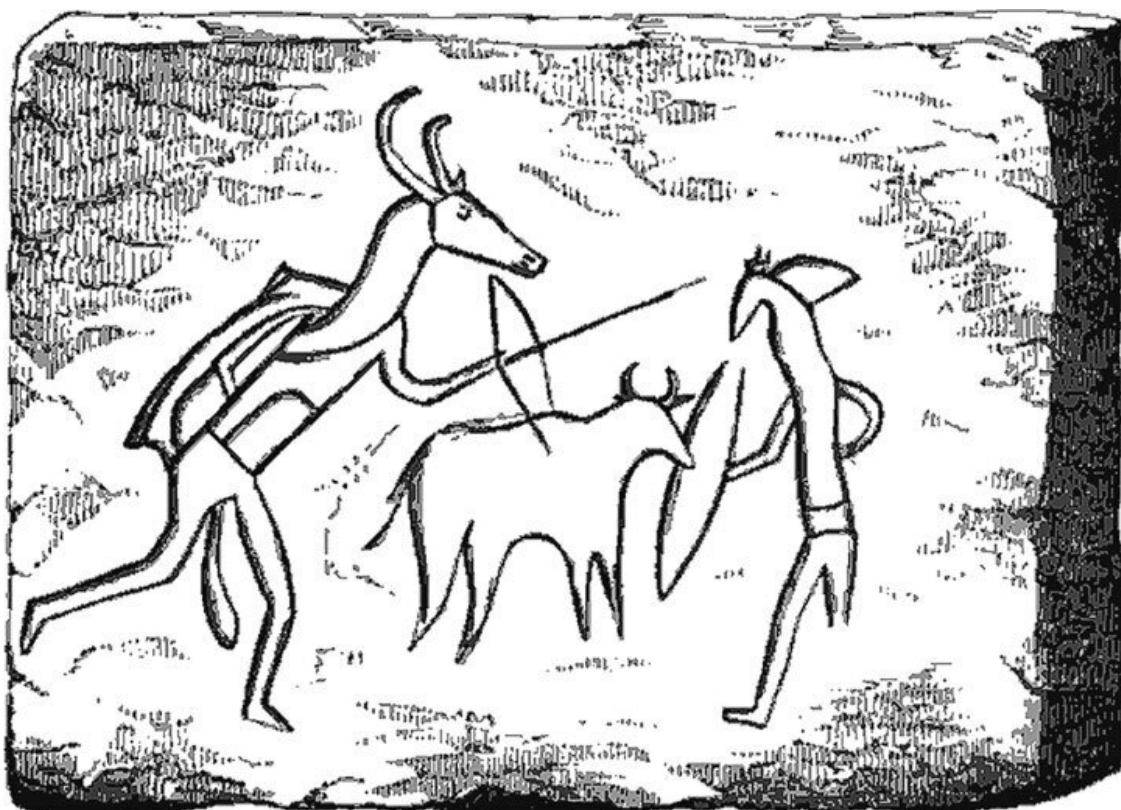


Рис. 1. Рисунок из книги Барта (Barth, 1857, p. 197)

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 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 пловцов (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, которое 7 тыс. лет назад было размером с Каспийское море. И недавно выяв-

ленное наскальное изображение пресноводной медузы в центральной Сахаре уже не кажется столь фантастическим (Dumont, 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?



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

Теперь известно, что с периодичностью в 22 тыс. лет, подчиняясь циклам прецессии земной оси⁵, в Сахаре устанавливается влажный климат. Около 10 тыс. лет назад летняя инсоляция Северной Африки была выше примерно на 7 %. Это приводило к большому контрасту температур между сушей и океаном и усиливало летний муссон.

⁵ Подробнее об этом см. главу 3.

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 назад⁶. 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 Берингов пролив в ледниковые эпохи превращался в сухопутный мост, по которому и люди, и животные свободно перемещались между Азией и Америкой. Так произошло заселение Америки около 15 тыс. лет назад – вскоре после максимума последнего оледенения (Goebel et al., 2008).

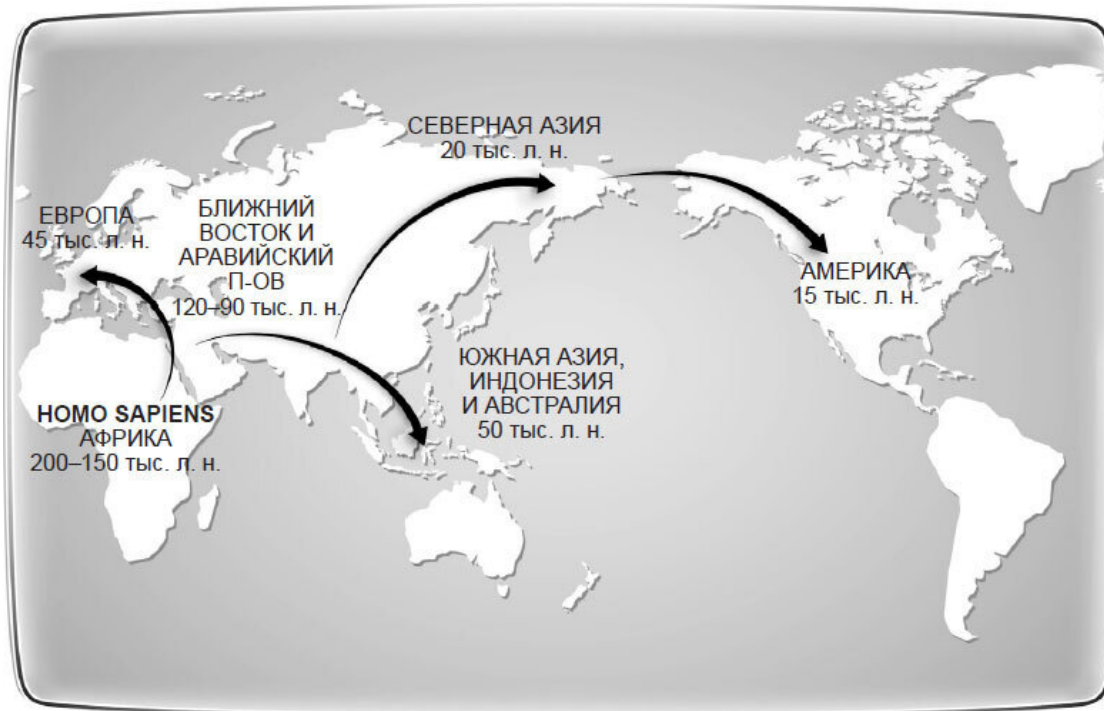


Рис. 3. Расселение *Homo Sapiens* по планете (De Menocal, Stringer, 2016)

⁶ В 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.

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 парапланериста 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 погодных 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 температура⁷ 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).

⁷ В дальнейшем не будем каждый раз повторять «усредненная по планете среднегодовая температура поверхностного слоя воздуха над сушей и океаном».

Рисунок 1.1 неизбежно вызывает ряд вопросов. Много это или мало – 1°C 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 синоптической⁸ метеорологии пришлось на середину XIX в. Отчасти этому способствовала Крымская война. 14 ноября 1854 г. сильнейший шторм разбил о скалы десятки британских и французских 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.

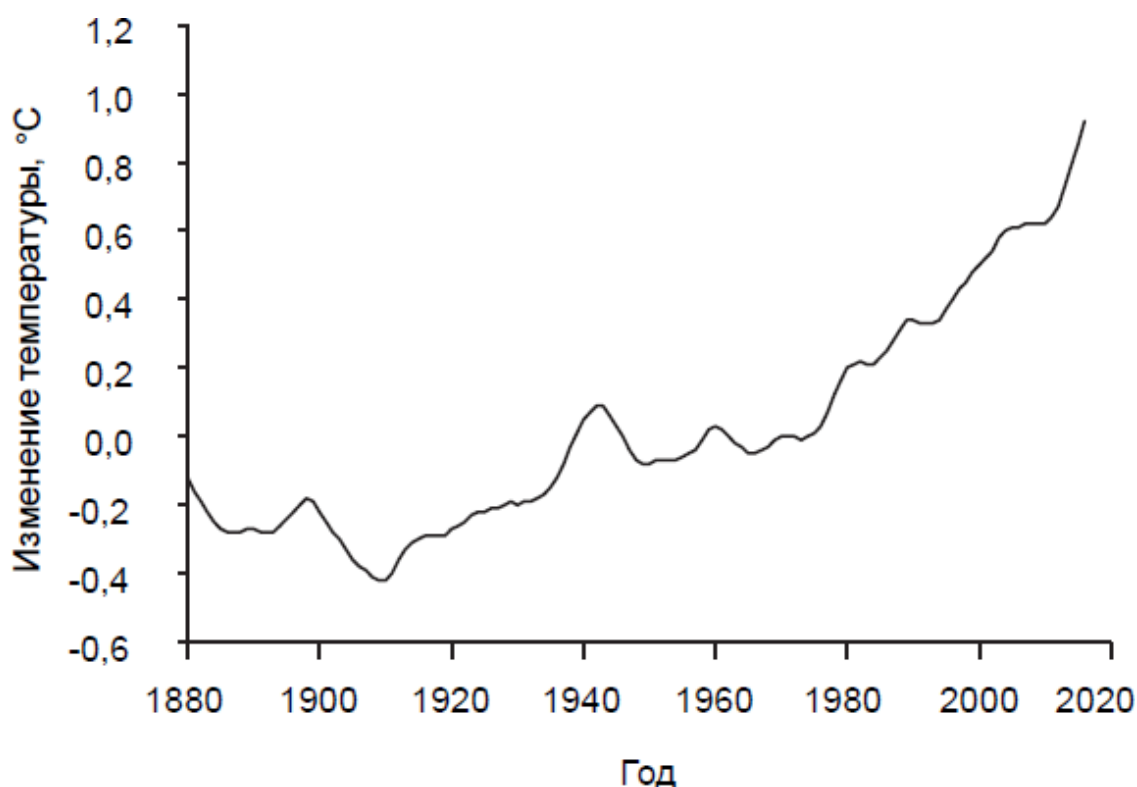


Рис. 1.1. Изменение среднегодовой температуры по данным NASA (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>). Изменение отсчитывается от среднего за период 1951–1980 гг.

⁸ 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.

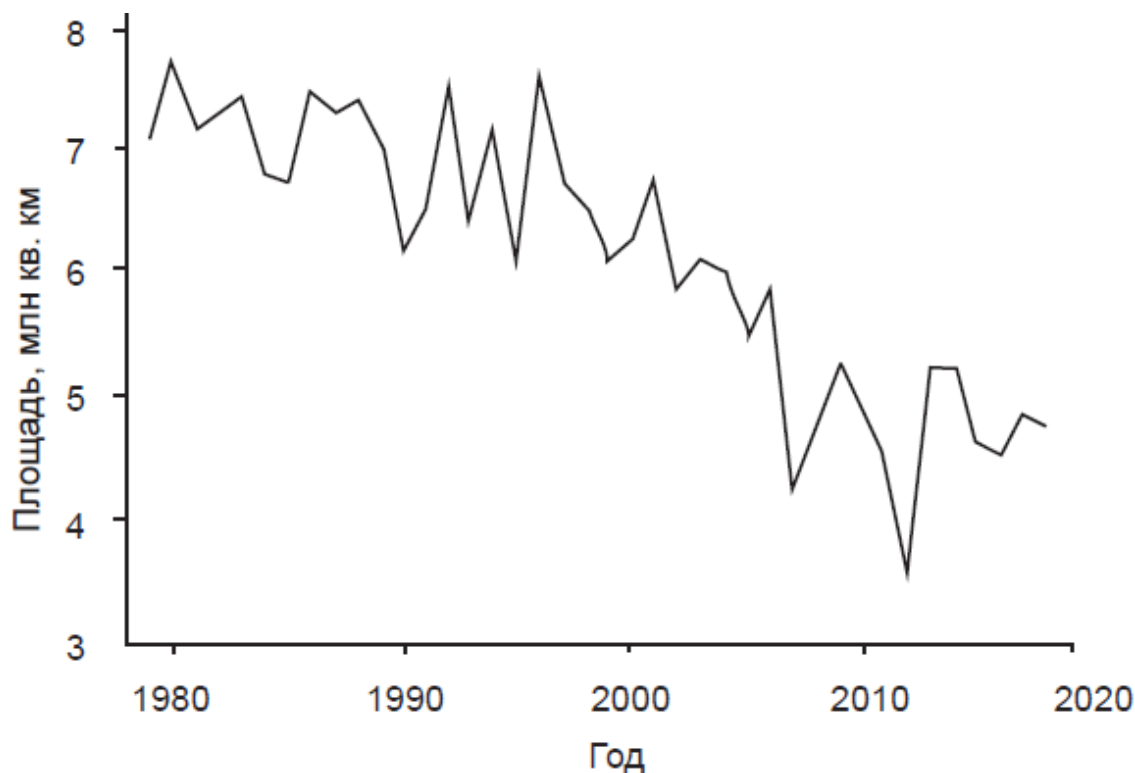


Рис. 1.2. Изменение площади морских льдов в Арктике в 1979–2018 гг. (сентябрь) (National Snow, Ice Data Center <https://nsidc.org>)

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 оце-

нить 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 $10\text{ }\mu\text{м}$. 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 что 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, Леан, 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 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 рассчитать⁹ 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

⁹ 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.

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 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$!

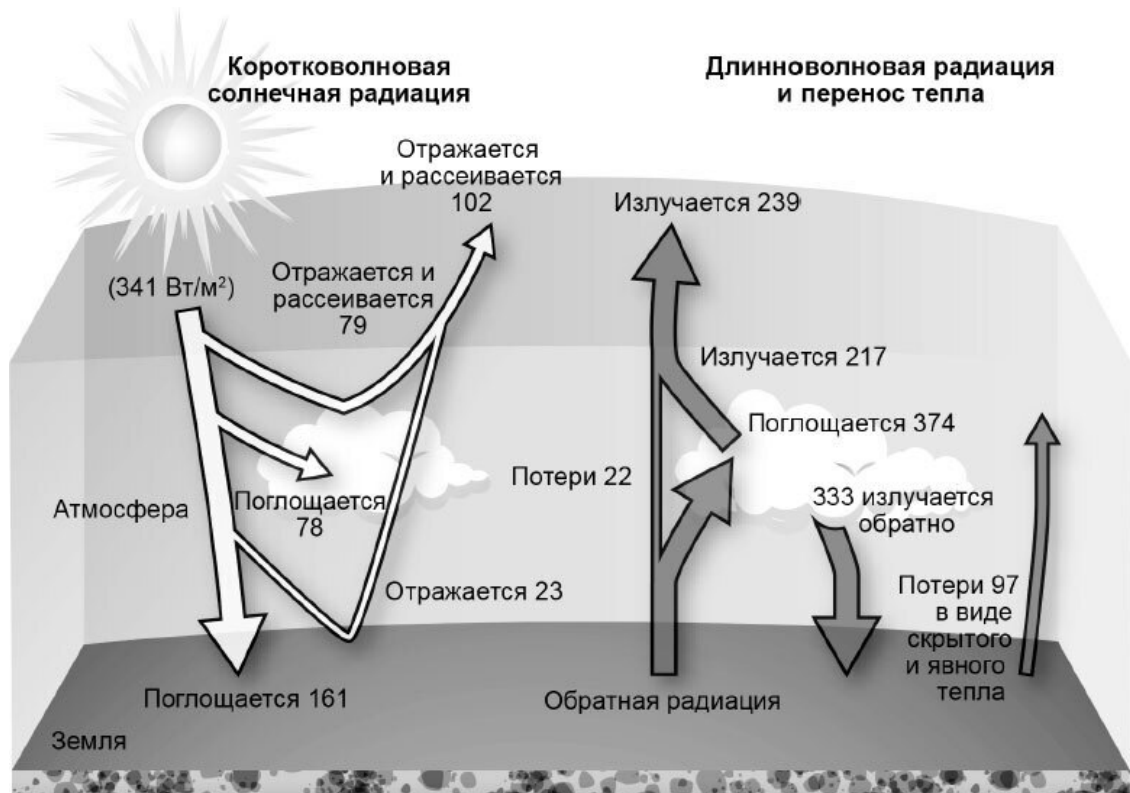


Рис. 1.4. Радиационный баланс Земли. Подробнее см. (Kiehl, Trenberth, 1997)

1.3. Состав и строение атмосферы

Газовая оболочка Земли – атмосфера – удерживается силой тяготения. Плотность и давление воздуха с высотой уменьшаются примерно по экспоненциальному закону. Четкой границы между атмосферой и космическим пространством нет, обычно за толщину атмосферы принимают высоту в 100 км.

Атмосфера нашей планеты состоит преимущественно из азота и кислорода. Третий по распространенности компонент – инертный газ аргон. В значительно меньших количествах содержатся углекислый газ, неон, гелий, метан, криптон, водород и закись азота, монооксид углерода (табл. 1.1). Кроме того, воздух может содержать до 5 % по объему паров воды¹⁰.

Газовый состав атмосферы сформировался в результате ее эволюции; об этом будет более подробно рассказано в главе 3. Состав воздуха в масштабах нашей жизни можно считать постоянным. Большинство компонентов находятся в динамическом равновесии – сколько убывает, столько же и пополняется за счет тех или иных процессов. Исключение составляют лишь те, количество которых быстро растет в результате хозяйственной деятельности человека; в первую очередь это углекислый газ и метан.

Основной источник метана – болота и тундра; образуется он при бактериальном разложении органического вещества в анаэробных условиях. Антропогенные источники атмосферного метана – это в основном сельское хозяйство и добыча нефти и газа. В морской воде метан практически не растворяется, а выводится из атмосферы за счет фотохимического окисления.

Основные компоненты атмосферы – азот и кислород – имеют биогенное происхождение. Кислород образуется при фотосинтезе, азот – в результате бактериального восстановления нитратов. Аргон образуется в основном в результате радиоактивного распада калия-40, гелий – при распаде урана и тория. Вулканы выбрасывают диоксиды углерода и серы, хлороводород, фтороводород и другие газы. Некоторые компоненты, например, озон, образуются *in situ*¹¹, то есть в результате процессов в самой атмосфере.

Помимо компонентов, перечисленных в таблице 1.1, в атмосфере присутствуют многие вещества в следовых количествах: углеводороды (помимо метана), перекись водорода (H_2O_2), формальдегид ($HCHO$), оксиды азота (NO_x), аммиак (NH_3), диметилсульфид (CH_3SCH_3), сероводород (H_2S), сероуглерод (CS_2), гидроксильные ($OH\cdot$) и супероксидные радикалы ($HO_2\cdot$), пары ртути, радиоактивные инертные газы, в том числе радон, и многое другое. И хотя этих компонентов крайне мало в сравнении с основными, они могут существенно влиять на химические и физические процессы в атмосфере. Например, реакции с гидроксильными радикалами являются основным механизмом выведения из атмосферы большинства микрокомпонентов, того же метана. Радиоактивные инертные газы могут менять электропроводность атмосферы, влияя тем самым на количество гроз.

Таблица 1.1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СУХОГО ВОЗДУХА

¹⁰ Содержание водяного пара быстро меняется и сильно различается от места к месту. Поэтому, когда говорят о газовом составе воздуха, обычно имеется в виду сухой воздух.

¹¹ *In situ* – на месте (лат.).

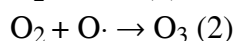
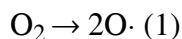
Компонент	Формула	Содержание, объемных долей ¹	Время пребывания ²	Происхождение
Азот	N ₂	78,084 %	1,6 млн лет	Биогенное
Кислород	O ₂	20,946 %	3–4 тыс. лет	Биогенное
Аргон	Ar	0,934 %	–	Радиогенное
Углекислый газ	CO ₂	0,040 %	3–4 года	Биогенное, вулканическое, антропогенное, горение органики
Неон	Ne	18,18 ppm	–	Вулканическое?
Гелий	He	5,24 ppm	–	Радиогенное
Метан	CH ₄	1,70 ppm	9 лет	Биогенное, антропогенное
Водород	H ₂	0,56 ppm	2 года	Биогенное, антропогенное
Закись азота	N ₂ O	0,31 ppm	150 лет	Биогенное, антропогенное
Монооксид углерода	CO	40–200 ppb	2 мес.	Фотохимическое, антропогенное, горение органики
Озон	O ₃	10–100 ppb	Дни – недели	Фотохимическое

¹ ppm – частей на миллион (*part per million*), ppb – частей на миллиард (*part per billion*).

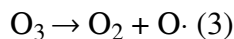
² При изучении поведения различных веществ в природе геохимики часто используют понятие **времени пребывания**. Под временем пребывания некоего компонента в некоторой системе обычно понимают отношение общего количества компонента в системе к скорости его выведения, или, что то же самое – к скорости поступления, если условия можно считать стационарными. Для ясности приведем пример. На химическом факультете университета обучаются 1300 студентов. В этом году было выпущено 258 специалистов. Получаем время пребывания студента в университете $1300/258 \approx 5$ лет. При этом кто-то мог учиться восемь лет, а кого-то отчислили в первую сессию. Этот расчет справедлив для стационарных условий. Если проводится реформа образования и срок обучения неожиданно увеличивается до 6 лет, или меняется план приема, он даст неверный результат.

Кроме обычного кислорода, состоящего из двухатомных молекул, в воздухе есть озон – модификация кислорода, состоящая из трехатомных молекул (O₃). Его количество крайне невелико – до 0,1 ppm, но он имеет важнейшее значение для радиационного баланса планеты и стратификации атмосферы. Озоновым слоем называют слой стратосферы на высоте 15–30 км, содержащий наибольшее количество озона – до нескольких ppm. Если бы весь озон атмосферы можно было бы собрать в одном слое, то толщина его при нормальном давлении составила бы 3 мм. В реальности он, конечно, не образует отдельного слоя и смешан с другими газами.

В стратосфере озон образуется при воздействии ультрафиолетового излучения на двухатомные молекулы кислорода:

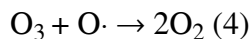


Поглощая ультрафиолет в области спектра 200–300 нм, озон снова расщепляется на атом и молекулу кислорода:

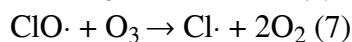


Атом кислорода, образовавшийся в реакции (3), снова взаимодействует с молекулой O_2 по реакции (2). Тем самым баланс озона восстанавливается, а энергия ультрафиолета превращается в кинетическую энергию молекул газа, то есть в тепло.

Распадается озон в результате взаимодействия с атомарным кислородом:



Озон разрушают оксиды азота, а также соединения галогенов, в частности фреоны. Распад озона под действием фреона можно описать так:



Содержание озона в стратосфере меняется в зависимости от широты и сезона. Локальное снижение концентрации озона называют *озоновой дырой*. Считается, что ее появление связано с антропогенными загрязнителями, разрушающими озон, в частности, с фреонами (реакции 5–7). Самая большая из озоновых дыр расположена в высоких широтах в Южном полушарии.

Именно поглощение озоном ультрафиолета приводит к появлению максимума температуры на высотах около 50 км. Вертикальное распределение температуры в атмосфере позволяет выделить в ней несколько слоев – тропосферу, стратосферу, мезосферу и термосферу (рис. 1.5). Границу раздела тропосферы и стратосферы называют *тропопаузой*. Большая часть процессов, определяющих погоду на поверхности Земли, происходит в тропосфере, где сосредоточено 80 % всей массы атмосферы. Именно тропосфера является областью турбулентного перемешивания, и в ней происходит перенос тепла из тропических широт в полярные. В тропосфере температура с высотой быстро снижается, примерно на 6,5 °C на 1 км. Это происходит потому, что с высотой давление падает.

В стратосфере температура с высотой, наоборот, увеличивается. Поэтому грозовые облака, достигающие верхней границы тропосферы, преодолеть тропопаузу не могут и начинают расти в ширину, приобретая характерную форму наковальни. Нагрев стратосферы обусловлен поглощением озоном в ультрафиолетовой области; в термосфере температура снова растет, но уже из-за других процессов: в основном из-за поглощения экстремального ультрафиолета (*Extreme Ultraviolet – XUV*) и рентгеновского излучения. Эти виды излучения обладают достаточно высокой энергией для того, чтобы вызвать фотодиссоциацию (расщепление молекул на атомы) и фотоионизацию (выбивание электронов) основных компонентов воздуха.

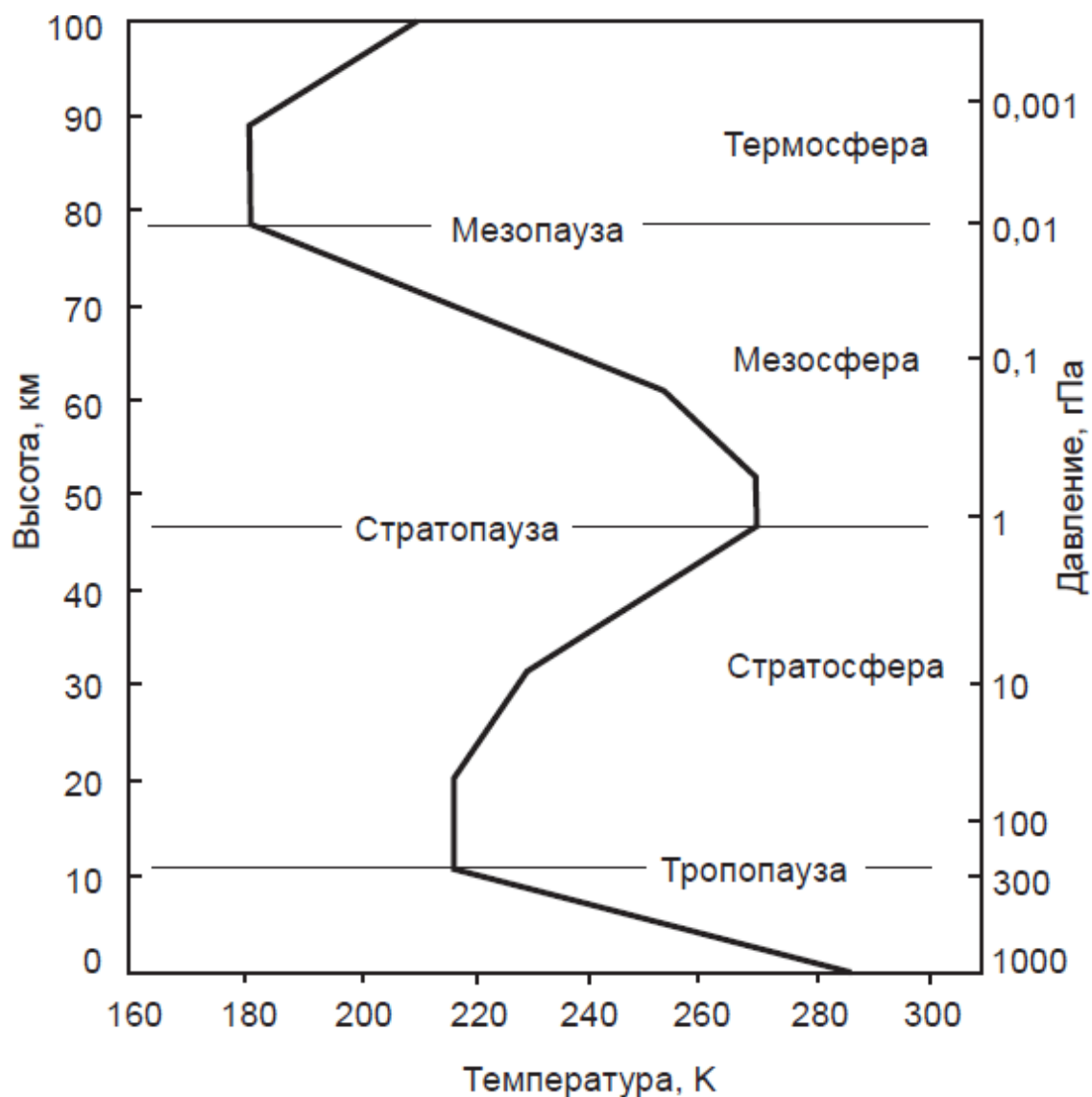


Рис. 1.5. Типичная стратификация атмосферы в средних широтах. От земной поверхности и до тропопаузы с высотой, как правило, становится холоднее. В стратосфере, напротив, температура с высотой растет

1.4. Климатическая система

Когда мы говорим о климате, мы подразумеваем в первую очередь состояние атмосферы, точнее, ее нижнего слоя – тропосферы. Это неудивительно, поскольку воздух и есть наша среда обитания, а поверхности Земли мы касаемся лишь подошвами ног. Атмосфера постоянно обменивается энергией и веществом с гидросферой, сушей, криосферой и биосферой (рис. 1.6). Вместе они образуют *климатическую систему*. Атмосфера является самой динамичной составляющей климатической системы, поскольку обладает относительно небольшой массой и низкой теплоемкостью. Поэтому она реагирует на внешние изменения быстро – от нескольких часов до недель.

Изменения в океане происходят гораздо медленнее, чем в атмосфере. Это вполне объяснимо: его масса примерно в 250 раз больше, а теплоемкость воды в 4 раза больше теплоемкости воздуха. Время реакции поверхностного слоя океана на внешние воздействия составляет от нескольких дней до месяцев, изменения в глубинных водах требуют сотен лет. Океан хранит огромный запас тепла и служит своего рода буфером, смягчающим сезонные изменения температуры воздуха.

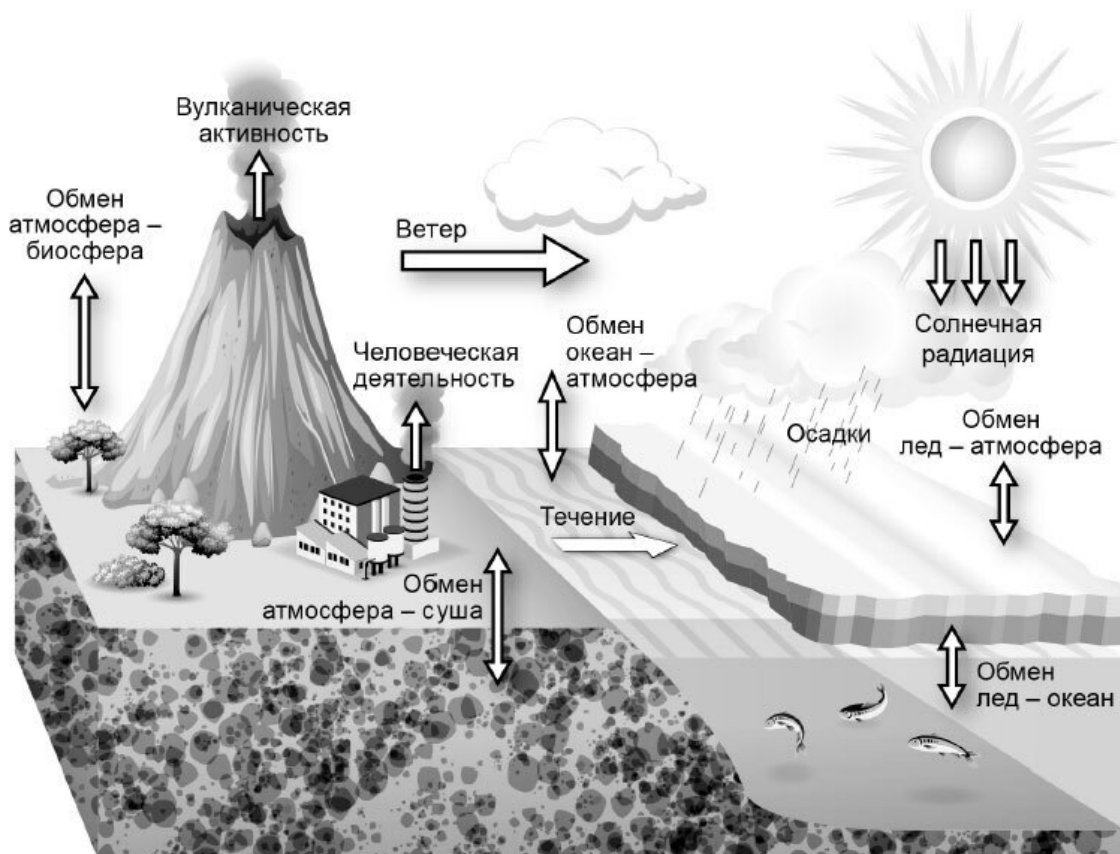


Рис. 1.6. Схематическое изображение климатической системы

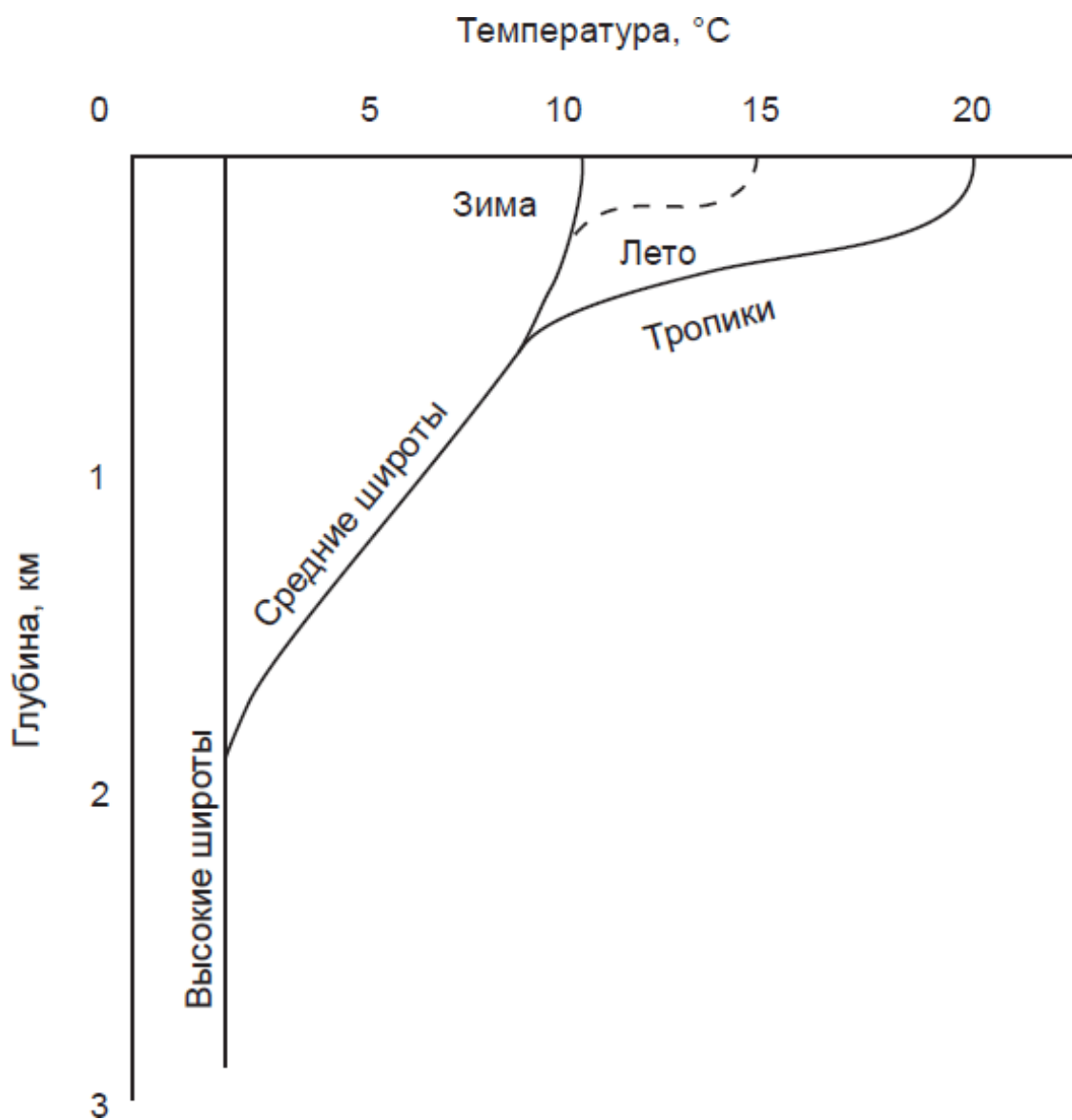


Рис. 1.7. Вертикальное распределение температуры в океане (Knauss, Garfield, 2016). В высоких широтах термоклин не выражен

Океан, в отличие от атмосферы, греется с поверхности. Большая часть солнечного тепла поглощается несколькими сантиметрами воды. Волны и ветер перемешивают верхний слой воды примерно до сотни метров. В итоге на поверхности образуется более теплый слой с меньшей плотностью. Он накрывает океан своеобразной крышкой и затрудняет вертикальное перемешивание. Слой, разделяющий теплые поверхностные и глубинные холодные воды, называется **термоклин**. В нем с глубиной резко меняется температура воды (рис. 1.7). С температурой и соленостью связана плотность морской воды. Слой, в котором плотность резко меняется, называется **пикноклин**.

Кроме того, океан содержит колоссальные запасы растворенного углекислого газа. Поглощая CO_2 из атмосферы и выделяя его, океан также влияет на климат. Важнейшую роль в этом процессе играет биота океана, усваивающая углерод в процессе фотосинтеза.

Атмосфера и океан находятся в постоянном движении. Главная причина этого движения — различия в количестве энергии, получаемой Землей в районе экватора и в высоких широтах. Циркуляция атмосферы и океана играет роль отопительной системы, перенося тепло из низких широт к полюсам.

Суша греется и отдает тепло быстрее, чем океан, и запасает тепла гораздо меньше. Основная причина заключается в том, что в океане тепло быстро распределяется в пределах перемешанного слоя, в то время как суша прогревается вглубь на 1–2 м. Это приводит к разнице температуры воздуха над сушей и над океаном и влияет на циркуляцию атмосферы. Сезонные перепады температур в Северном полушарии выражены сильнее, чем в Южном, потому что площадь суши там значительно больше.

Облик нашей планеты – соотношение континентов и океанов, высота горных хребтов и их расположение, рельеф дна, глубина проливов – сильнее всего влияет на климат: на распределение тепла по поверхности планеты, циркуляцию вод океана, движение воздушных масс.

Суша, океан и биосфера могут воздействовать на климатическую систему через образование аэрозолей (рис. 1.8). Пузырьки воздуха, лопаясь на поверхности океана, образуют мельчайшие капельки воды. Когда вода испаряется, в воздухе остаются частички соли. Другие источники аэрозолей – пылевые бури, лесные пожары и вулканы, а также транспорт и промышленность. Они влияют на радиационный баланс планеты, поскольку могут отражать, рассеивать и поглощать солнечный свет. Также аэрозоли играют важную роль в формировании облаков, поскольку аэрозольные частицы могут выступать в роли ядер конденсации.



Рис. 1.8. Миллионы тонн пыли из Сахары переносятся ежегодно ветром через Атлантику (Yu et al., 2015). Содержащийся в пыли фосфор – ценное удобрение для лесов Амазонки. Приведенный пример является прекрасной иллюстрацией того, что в климатической системе все взаимосвязано. Аэрозоли также поглощают и рассеивают солнечное излучение и служат ядрами конденсации водяных капель, способствуя образованию облаков. На фото – пыль из Сахары над Канарскими островами. Источник изображения: NASA

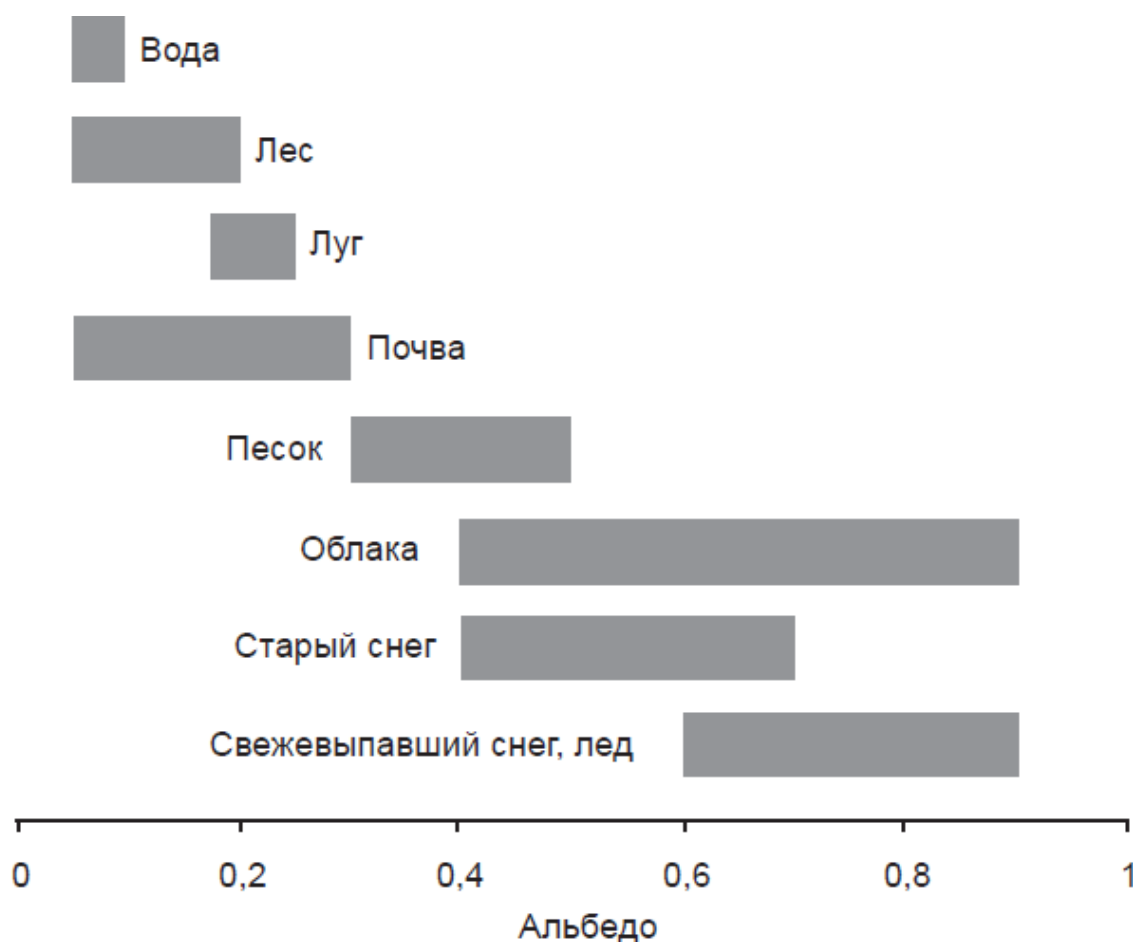


Рис. 1.9. Диапазон значений альбедо различных поверхностей (Ruddiman, 2014). Величина альбедо зависит от угла падения солнечных лучей, поэтому поверхности со сходными свойствами в высоких широтах отражают больше света

Важнейшую роль в климатической системе играют снег и лед – в первую очередь за счет высокой отражающей способности или, как говорят климатологи, высокого **альбедо**¹² (рис. 1.9). Ледяные шапки полярных широт медленно меняются в течение тысяч и десятков тысяч лет; горные ледники реагируют на внешние воздействия быстрее – от 10 до 100 лет. Площадь снежного покрова и морских льдов может существенно меняться за дни и недели. Снег, выпавший на сушу, может лежать всю зиму. В Северном полушарии площадь суши значительно больше, поэтому в целом на планете площадь снежного покрова удваивается от августа к декабрю (Bradley, 2015). Морские льды также влияют на климат, затрудняя перенос тепла из относительно теплого океана в атмосферу и сохраняя Арктику холодной.

Биосфера – также важнейший компонент климатической системы. Леса составляют около трети площади суши и существенно влияют на альбедо Земли и на скорость испарения влаги. И что для нас особенно важно – растения влияют на состав атмосферы, захватывая углекислый газ и выделяя кислород. Именно присутствие живых организмов создало кислородную атмосферу на планете, а не наоборот. Растительность реагирует на изменения влажности и температуры довольно быстро – от нескольких часов до столетий.

¹² От лат. *albus* – белый. Величина альбедо меняется от 0 до 1. Среднее планетарное альбедо Земли около 0,3. Это значит, что около 30 % излучения отражается Землей обратно в космическое пространство (см. рис. 1.4).

Предположим, что по каким-то причинам возник дисбаланс¹³ между приходом и расходом энергии в климатической системе. Например, энергии стало поступать больше или уходить чуть меньше. Казалось бы, Земля немного нагреется и станет излучать больше энергии в пространство. В итоге радиационный баланс восстановится, но уже на другой ступеньке. Однако простые ответы не всегда правильные. Может случиться так, что климатическая система отреагирует на воздействие более сложным, нелинейным образом.

Когда происходит какое-либо изменение в балансе энергии, в климатической машине включаются механизмы положительного или отрицательного отклика, или **обратной связи** (рис. 1.10). Так, повышение температуры приводит к сокращению ледяного и снежного покрова. Альbedo Земли уменьшается, энергии поглощается больше, от этого становится еще теплее. И наоборот – при похолодании льды в полярных областях наступают, Земля отражает больше света, и холодает еще сильнее. Это работает положительная обратная связь лед – альbedo. Потепление приводит к таянию многолетней мерзлоты. При этом высвобождаются парниковые газы – CO_2 и метан. Они, в свою очередь, усиливают потепление. Это еще один пример положительного отклика, хотя ничего хорошего в этом, безусловно, нет – положительные обратные связи раскачивают климатическую систему, усиливая первоначальное воздействие. Отрицательные обратные связи, напротив, стабилизируют ситуацию. Так, с ростом температуры вода океана испаряется сильнее, растет площадь облаков, а они отражают солнечные лучи, охлаждая планету. Еще один пример отрицательной обратной связи – рост содержания углекислого газа в атмосфере идет на пользу растениям, которые, в свою очередь, эффективнее его утилизируют, возвращая систему в исходное состояние. Подобных обратных связей в климатической системе множество: проще говоря, все связано со всем. Многие из них изучены недостаточно.



Рис. 1.10. Пример системы с обратной связью. Отрицательная обратная связь: в котелке вода. При слишком бурном кипении она перельется через край, и огонь станет слабее. Положительная обратная связь: в котелке масло или керосин. Положительные обратные связи в тех-

¹³ В англоязычной литературе используется термин *forcing*, который без перевода все чаще используется и в отечественной литературе. Форсинг представляет собой разность между энергией, приходящей от Солнца, и рассеиваемой Землей в пространство.

нике – кошмар любого инженера. Именно их наличие в конструкции атомного реактора стало причиной катастрофы на Чернобыльской АЭС

1.5. Циркуляция атмосферы

Не существует на нашей планете Северного и Южного ветров, играющих сколько-нибудь важную роль. Северные и Южные ветры – лишь маленькие принцы тех династий, которые делают погоду на море. Они никогда не претендуют на господство на обширных пространствах. Они зависят от местных условий – конфигурации берегов, формы проливов, опасных мест у неприступных мысов, где они разыгрывают свою второстепенную роль. В государстве ветров, как и среди народов земного шара, настоящая борьба происходит лишь между Востоком и Западом¹⁴.

Джозеф Конрад. Зеркало морей

Как уже было сказано, движение атмосферы возникает вследствие неравномерного нагрева земной поверхности. Из-за сферической формы Земли в тропиках на единицу площади приходится больше солнечной энергии, чем в высоких широтах. Кроме того, в районе полюсов солнечные лучи проходят больший путь в атмосфере, прежде чем достигнут поверхности планеты, а значит, рассеиваются сильнее. Неравномерный нагрев приводит к неравномерному распределению атмосферного давления. Разница давлений (барический градиент) заставляет двигаться воздушные массы. Однако вращение Земли существенно влияет на это движение. Чтобы понять, как это происходит, рассмотрим простой пример.

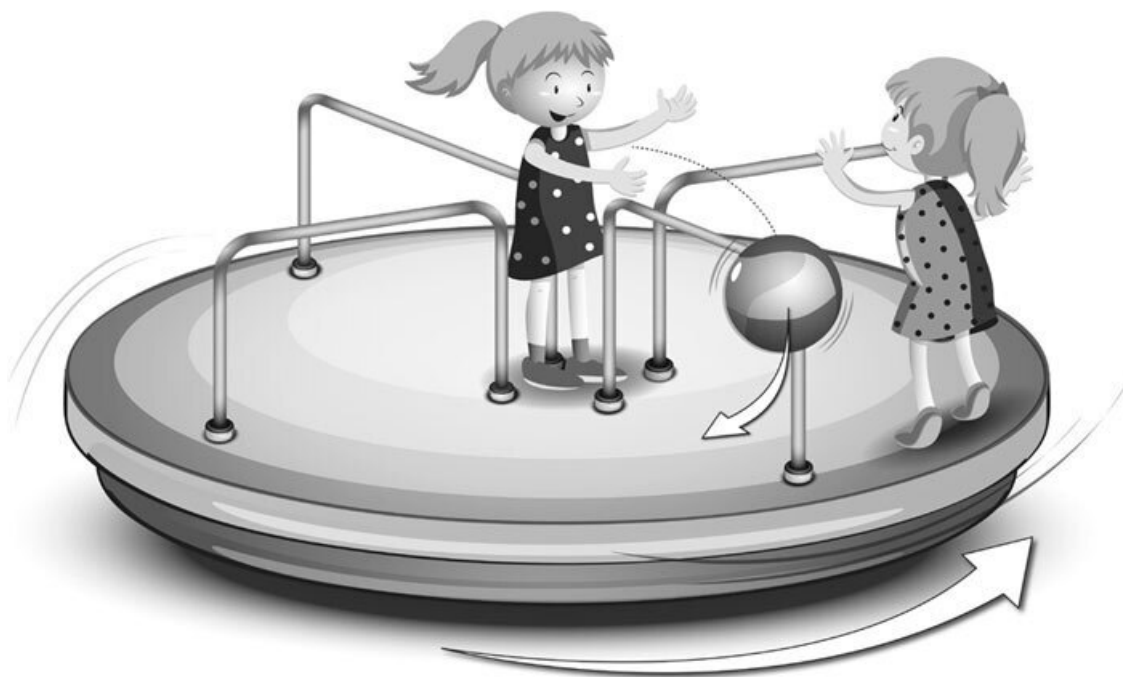


Рис. 1.11. Девочки на карусели. Для наблюдателя во вращающейся системе мяч летит по дуге

Зоя и Нина катаются на карусели. Зоя стоит в центре, а Нина – на краю. Зоя бросает мяч в сторону Нины. Мяч летит прямо. Но Нина не поймает его. Пока мяч летел, карусель крутилась, и Нина сместилась (рис. 1.11). Никакая дополнительная сила на мяч не действовала, он просто

¹⁴ Перевод М. Е. Абкиной.

летел прямо, своей дорогой. Это площадка карусели уходила из-под него. Но с точки зрения Нины, вращающейся вместе с каруселью, траектория мяча оказалась искривленной.

Живя на поверхности вращающейся планеты, мы не сильно отличаемся от девочек на карусели; разница лишь в том, что мы привыкли к этому движению и не осознаем его.

Эффект искривления траектории движения тел с точки зрения наблюдателя, находящегося во вращающейся системе отсчета, называется *эффектом Кориолиса*. Иногда для удобства считают, что система неподвижна, и вводят дополнительную фиктивную силу, называемую *силой Кориолиса*. Сила фиктивна, но ее проявления в нашем вращающемся мире вполне реальны. Эффект и сила названы в честь французского математика Гюстава Гаспара де Кориолиса (1792–1843).

Если объект движется в Северном полушарии с севера на юг, он отклоняется к западу. Это происходит потому, что Земля вращается вокруг своей оси с запада на восток. Очевидно, что точки на экваторе вращаются быстрее, чем точки, расположенные ближе к полюсам. Если движение происходит с юга на север, то отклонение происходит на восток, то есть в любом случае вправо.

Отклоняются объекты, движущиеся не только в меридиональном, но и в любом другом направлении. Не отклоняются лишь те, что движутся вдоль экватора. Действует универсальное правило: в Северном полушарии движущиеся объекты отклоняются вправо, в Южном – влево.

Атмосфера нагревается снизу, тепло она получает главным образом от поверхности суши или океана. В районе экватора, где поток солнечной энергии наибольший, воздух нагревается наиболее сильно, становится менее плотным и поднимается вверх. Так формируется зона пониженного давления в районе экватора, называемая *внутритропической зоной конвергенции*. Поднявшись до границы тропосферы, воздух не может преодолеть ее и движется в направлении полюсов, причем сила Кориолиса отклоняет его в восточном направлении. Воздух постепенно теряет тепло, излучая его в пространство. Остыв, он тяжелеет и опускается вниз, образуя зоны высокого давления по обе стороны от экватора в субтропиках, примерно на 30-м градусе широты. Так в атмосфере образуется тропическая ячейка циркуляции, или *ячейка Хэдли* (рис. 1.12), названная в честь английского ученого Джорджа Хэдли (1685–1768), искавшего причину пассатных ветров. Восходящей ветви ячейки Хэдли соответствует зона влажных экваториальных лесов, в нисходящей расположена большая часть пустынь (Сахара, Намиб, Австралийская пустыня, пустыни юга США). Это происходит потому, что в районе экватора влажный воздух поднимается, влага конденсируется и проливается дождями. Затем уже утративший влагу воздух движется от экватора. Когда воздух опускается, он нагревается и становится еще более сухим.

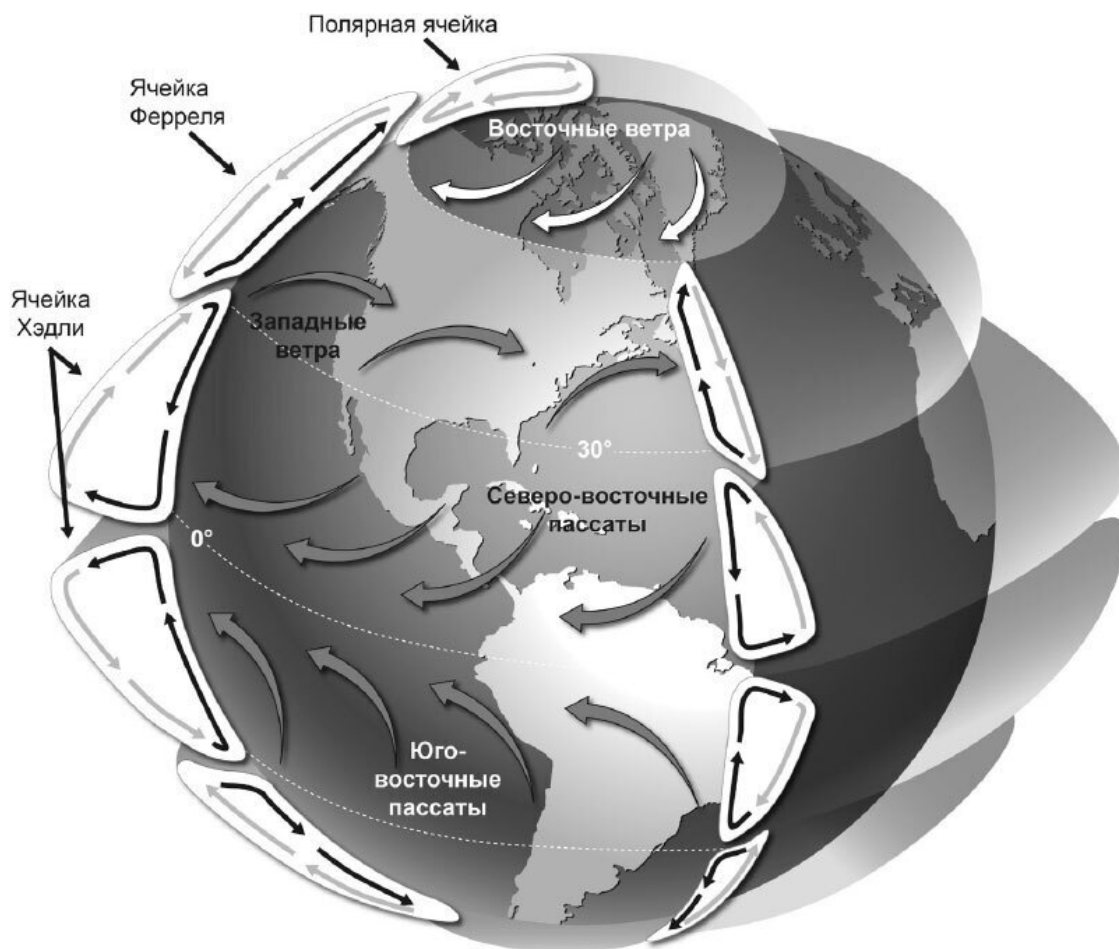


Рис. 1.12. Упрощенная схема крупномасштабной циркуляции атмосферы. Вращение Земли вокруг оси приводит к формированию трех ячеек циркуляции в каждом полушарии. Это затрудняет эффективный перенос тепла от экватора к полюсам. В реальности картина существенно сложнее, в частности из-за неравномерного нагрева суши и океана

У поверхности Земли тропическая циркуляция образует постоянную систему ветров, дующих из области высокого давления в субтропиках в зону низкого давления в районе экватора и благодаря эффекту Кориолиса отклоняющихся на запад. Эти ветры называются пассатами. Они дуют постоянно между 15 и 10 градусами с северо-востока в Северном полушарии, и с юго-востока – в Южном. Вблизи 30-го градуса широты в районе нисходящей ветви ячейки Хэдли над океаном формируются зоны высокого давления – здесь преобладают субтропические антициклоны. В центрах антициклонов, как правило, наблюдается безветренная погода. В эпоху парусных кораблей моряки называли эти широты конскими, потому что корабли, перевозившие лошадей через Атлантику, часто попадали в штиль в этих широтах и из-за нехватки воды и корма были вынуждены выбрасывать лошадей за борт. Штилевой пояс также располагается в районе экватора во внутритропической зоне конвергенции.

В высоких широтах формируется **полярная ячейка** циркуляции с нисходящей частью у полюсов и восходящей – в субполярных широтах около 60°. Между ней и ячейкой Хэдли иногда изображают ячейку с обратным направлением циркуляции – **ячейку Ферреля**, но она значительно менее выражена, чем тропическая и полярная ячейки. В умеренных широтах преобладают западные ветры, не столь устойчивые по силе и направлению, как пассаты.

1.6. Океан в движении

Движение вод в океане вызвано тремя причинами: силами тяготения Луны и Солнца; ветрами; различиями в плотности вод, которая зависит от солености и температуры.

Когда ветер дует над поверхностью океана, он приводит в движение и поверхностный слой воды. Вода движется медленнее, чем ветер. Если бы Земля при этом не вращалась, то движение воды по направлению совпадало бы с ветром. Но сила Кориолиса отклоняет воду вправо от направления ветра в Северном полушарии и влево – в Южном.

Это явление обнаружил норвежский полярный исследователь Нансен во время знаменитого дрейфа «Фрама». Он заметил, что движение корабля, вмерзшего в дрейфующий лед, отклоняется вправо на $20\text{--}40^\circ$ от направления ветра. Объяснение этому явлению дал шведский океанолог Вагн Экман (1874–1954). Поверхностный слой воды приводится в движение ветром. Двигается он медленнее, чем ветер, а значит, отклоняется силой Кориолиса сильнее. Верхний слой воды приводит в движение слой нижележащий, тот – следующий, благодаря чему отклонение от первоначального направления с глубиной усиливается (рис. 1.13).

До глубины 100–150 м *спираль Экмана* делает примерно пол-оборота. Здесь направление движения воды противоположно направлению на поверхности, но скорость уже слишком мала – около 4 % от поверхностной. Результирующий перенос воды происходит под углом 90° к первоначальному направлению ветра.

Энергия ветра передается лишь верхним 100–200 м воды. Однако экмановский перенос приводит к тому, что в некоторых зонах океана происходит подъем уровня поверхности, в других, напротив – понижение (рис. 1.14). Разность уровней приводит к перепаду давлений и, как следствие, к движению воды. Градиент давления уравнивается силой Кориолиса, и движение воды происходит вдоль линий, соединяющих точки с равной высотой, – такое течение называется *геострофическим*. К геострофическим близки по природе основные течения Мирового океана, такие как Гольфстрим, Кuroсио, Агульяс, Антарктическое циркумполярное и другие. Геострофические течения достигают глубин до 2 км.

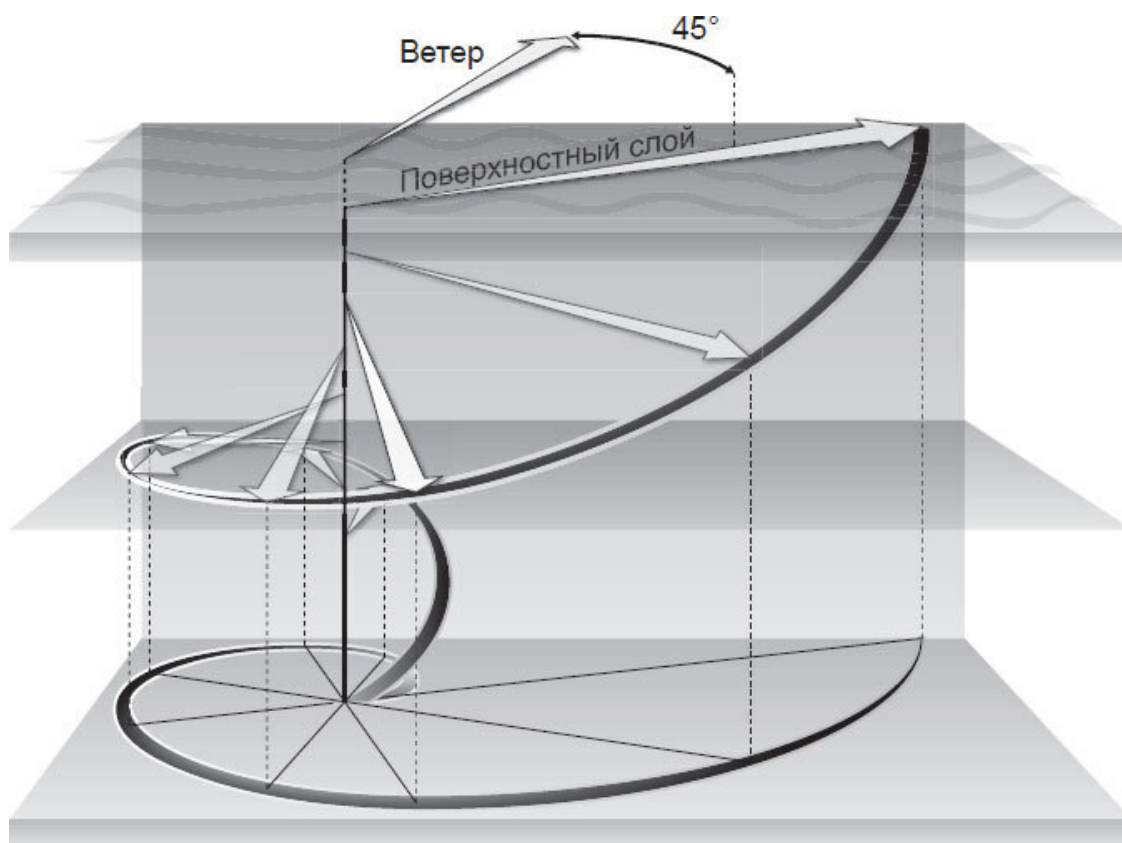


Рис. 1.13. Спираль Экмана

Экмановский перенос в сочетании с влиянием континентов приводит к образованию замкнутых систем циркуляции в океанах (рис. 1.15). В центре океанических круговоротов уровень поверхности повышается примерно на 1 м относительно среднего уровня. Вода движется по часовой стрелке в Северном полушарии и против часовой – в Южном. Западная часть системы круговоротов, называемая западными пограничными течениями, переносит теплую воду от экватора в более высокие широты. К ним относятся упомянутые выше Гольфстрим, Кюросио, Агульяс. Западные пограничные течения более быстрые, узкие и глубокие, чем восточные. Асимметрия возникает из-за вращения Земли. Средняя скорость Гольфстрима 6,4 км/ч, ширина около 100 км. Гольфстрим переносит в 100 раз больше воды, чем все реки планеты. В действительности схема океанских течений выглядит существенно сложнее, чем показано на рис. 1.15, так как движение океана – процесс хаотический, в нем возникают *меандры* и *вихри* (рис. 1.16). Иногда они могут достигать сотен километров в диаметре и существовать до нескольких лет.

В центрах основных круговоротов Мирового океана скапливается дрейфующий мусор, поступающий с континентов. На акватории в 1,6 млн км² (это примерно 1/10 часть площади России) плавает около 100 тыс. т пластика. Почти наполовину этот мусор состоит из рыбацких сетей. Большая часть выловленных пластиковых объектов имеет маркировку на японском (30 %) и китайском (30 %) языках.

В апреле 2011 г. после землетрясения Тохоку, цунами и взрыва на Фукусиме автор этой книги в составе экспедиции на научно-исследовательском судне «Павел Гордиенко» на Дальнем Востоке изучал радиоактивное загрязнение акватории и атмосферы. За сотню миль за Сангарским проливом море было покрыто следами недавней трагедии: плавали куски пенопласта, крышки, сколоченные между собой доски, резиновые мячики, ящики от шкафов. Скорее всего, часть этого мусора плавает и сейчас, пополнив Большое Тихоокеанское мусорное пятно

– крупнейшее из скоплений мусора в Мировом океане. Землетрясение Тохоку вызвало увеличение площади пятна на 10–20 % от общего ее прироста с 2011 г. (Lebreton et al., 2018).

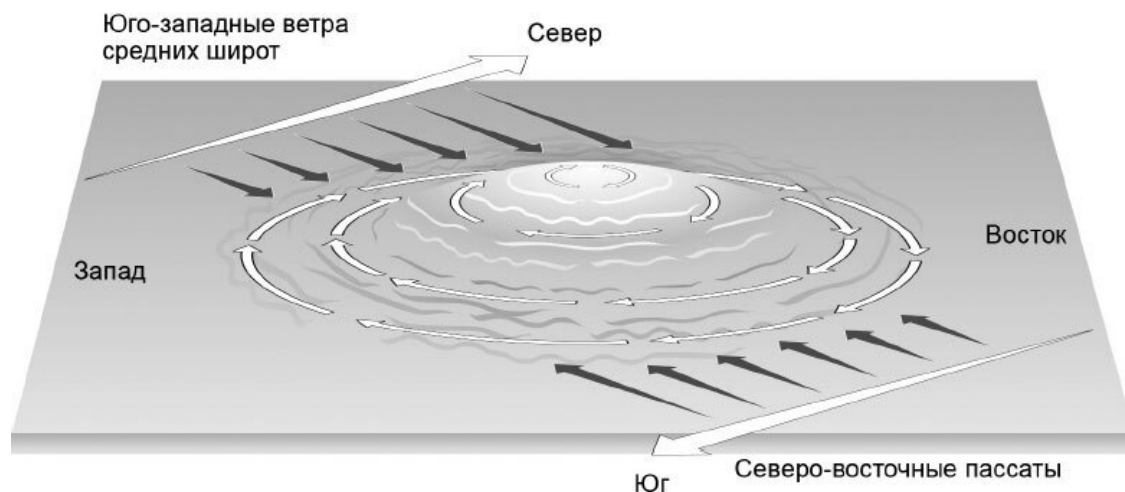


Рис. 1.14. Образование океанических круговоротов в Северном полушарии. В результате экмановского переноса в центре круговорота уровень океана поднимается, и формируется водяная линза. Вода движется под действием разности давлений из-за наклона поверхности и силы Кориолиса

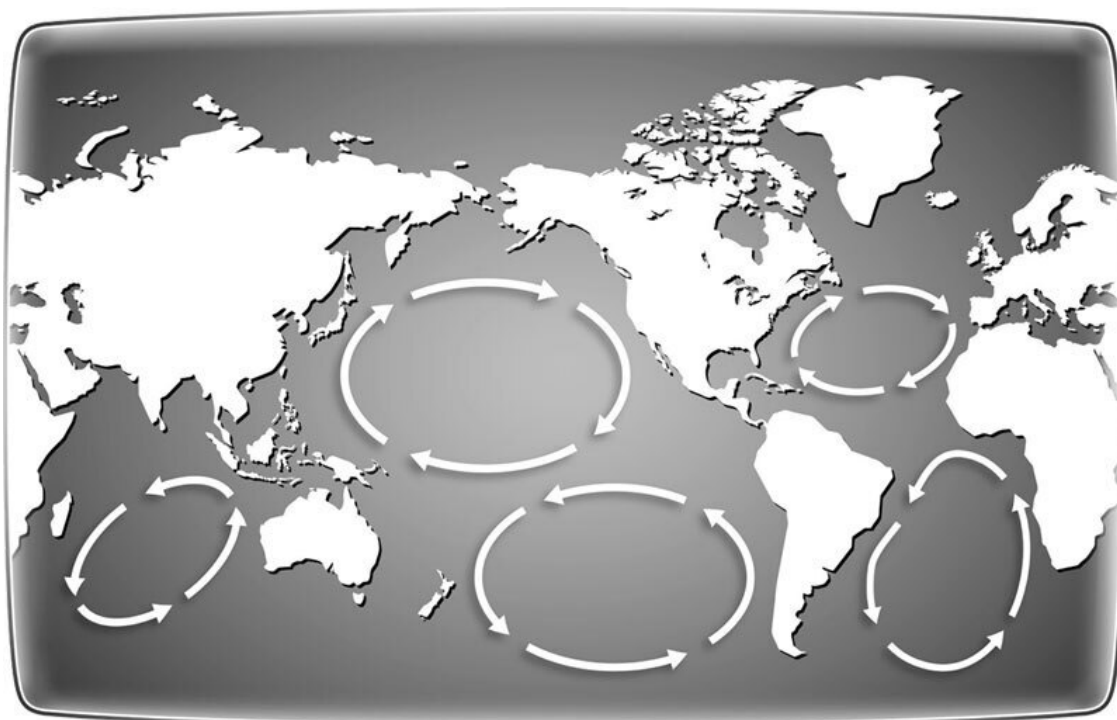


Рис. 1.15. Замкнутые системы океанических течений. Упрощенная схема объединяет их в пять круговоротов: два – в Атлантике (в Северной и Южной), два – в Тихом океане и один – в Индийском

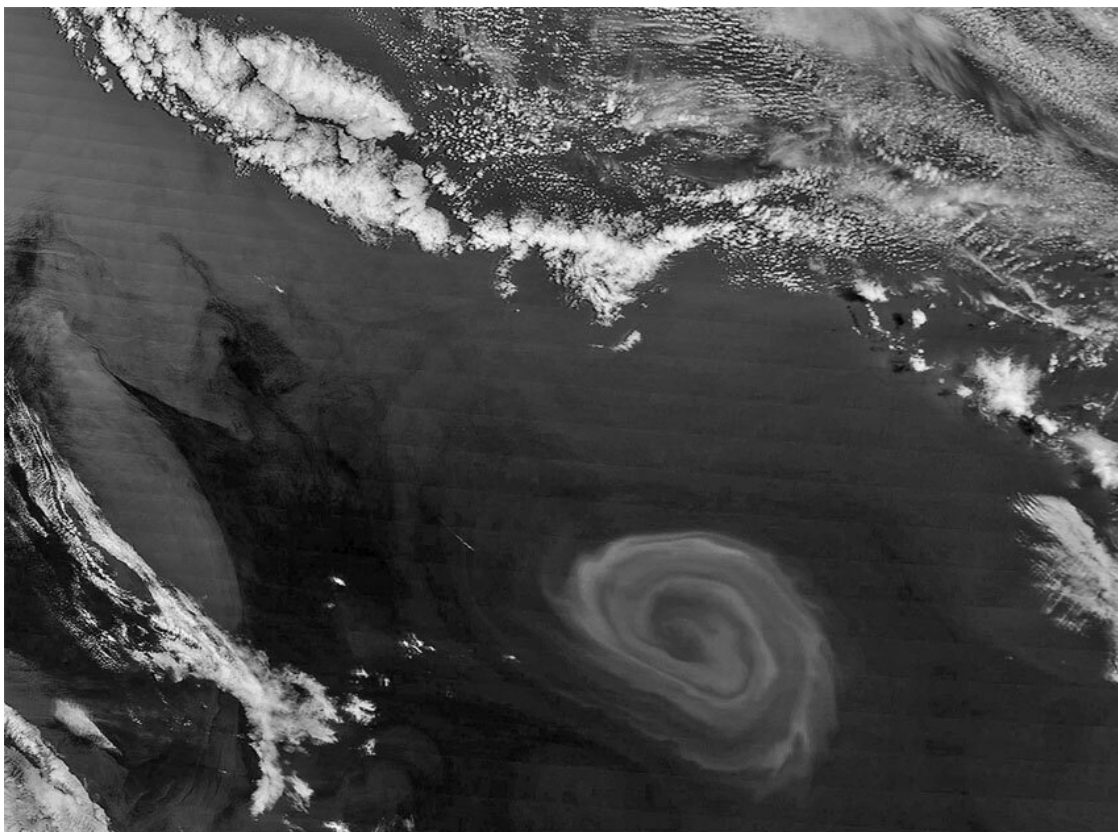


Рис. 1.16. Антициклонический вихрь (*ринг*) в океане размером примерно 150 км хорошо виден благодаря цветению фитопланктона. Он находится примерно в 800 км к югу от Южной Африки. По-видимому, вихрь отделился от течения Агульяс, направленного на юг вдоль восточного побережья Южной Африки. Вихри Агульяс – важная составляющая в переносе энергии и вещества из Индийского океана в Южный. Фото: NASA

Скопления мусора есть и в других круговоротах – в субтропической части Южной Атлантики (Ryan, 2014) и в южной части Тихого океана (Eriksen et al., 2013).

Течения, вызванные ветрами, затрагивают поверхностный слой океана и зону пикноклина (примерно до 1 км в глубину) и приводят в движение лишь небольшую часть (примерно 10 %) вод океана. Помимо ветров и приливных сил, существует еще один важнейший механизм, приводящий в движение весь океан. Это так называемая **термохалинная циркуляция**, которая связана с различиями в плотности воды из-за перепадов температуры и солености. В этот относительно медленный процесс вовлечена большая часть вод океана. Ключевым регионом, в котором запускается термохалинная циркуляция, является Северная Атлантика. Теплые воды Гольфстрима и его продолжения – Северо-Атлантического течения – движутся на север. Они передают тепло атмосфере, по мере испарения становятся все более холодными и солеными, постепенно тяжелеют и опускаются на глубину.

Почему именно в Северной Атлантике образуются глубинные воды? Это связано с неравномерным распределением соли в водах Мирового океана. Самые соленые поверхностные воды находятся в тропиках (15–30 градусов широты), где испарение превышает выпадение осадков. Оказывается, поверхностные воды в Атлантике существенно солонее, чем в Тихом океане. На одной и той же широте это различие составляет 1–2 г/л! Это результат взаимодействия преобладающих ветров с горными цепями Америки. В умеренных и субтропических широтах естественным барьером на пути западного переноса являются Кордильеры, тянущиеся от Аляски до Огненной Земли. Они не пускают влагу из Тихого океана вглубь континентов. Напротив, влага из Атлантики может проникать в Тихий океан с пассатами, дующими с востока

на запад в тропиках, через понижение в центральной части Кордильер в районе Панамского перешейка. В результате влага, испаряющаяся в тропической Атлантике, проливается дождями в тропической части Тихого океана. Поскольку обратный перенос влаги затруднен, формируется разница в солености между Тихим и Атлантическим океанами. Эта разница и служит тем мотором, что приводит в движение глубинные воды Мирового океана. Работа его возможна лишь благодаря относительно небольшому разрыву в горной системе Кордильер.

В северной части Тихого океана глубинные воды не образуются – поверхностные воды здесь слишком распресненные, чтобы опуститься на дно. В Индийском океане они слишком теплые.

Важнейшую роль в циркуляции вод играет Южный океан. Через него глубинные воды Атлантики достигают Тихого океана. В Южном океане также происходит образование глубинных вод: в море Уэдделла в атлантическом секторе Антарктики и в море Росса (Rahmstorf, 2006). Механизм образования глубинных вод здесь иной. Когда море замерзает, растворенная соль большей частью вытесняется из льда в воду. Это было хорошо известно полярным путешественникам прошлого, которые использовали многолетние морские льды как источник пресной воды. Поэтому при образовании морских льдов формируются тяжелые, обогащенные солью массы воды. Они опускаются вниз и заменяются менее плотными, тем самым внося вклад в циркуляцию океана (Kuhlbrodt et al., 2007). Важную роль в формировании глубинных вод в Южном океане играют полярные льды, образующиеся под действием ветра, – через них происходит интенсивная потеря тепла. В Южном океане образуется примерно половина глубинных вод.

Термохалинная циркуляция – физический механизм, а не реально наблюдаемый процесс. Ее нельзя считать отдельным видом движения океана. Именно сочетание термохалинной циркуляции с поверхностными течениями и подъемом глубинных вод, так называемым *апвеллингом*¹⁵, приводит к запуску Большого океанического конвейера, то есть к вентилированию всей водной толщи Мирового океана (рис. 1.17). Определение радиоуглерода в морской воде (подробнее см. главу 2) показало, что время жизни глубинных вод достигает 1 тыс. лет. Это среднее время, которое каждая частичка воды проводит в толще, прежде чем апвеллинг поднимет ее на поверхность.

¹⁵ От англ. *up* – вверх, и *well* – колодец.

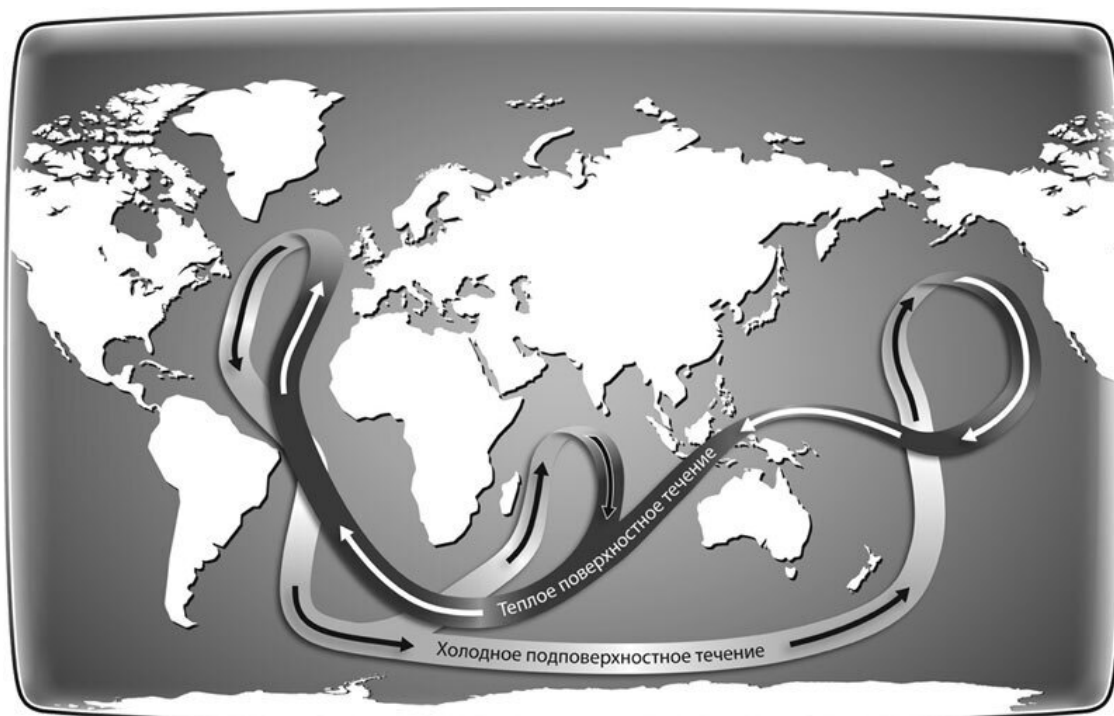


Рис. 1.17. Схематическое изображение Большого океанического конвейера (Вроескер, 1991)

1.7. Хаос в климатической системе: бабочка Лоренца против демона Лапласа

Она упала на пол – изящное маленькое создание, способное нарушить равновесие, повалились маленькие костяшки домино... большие костяшки... огромные костяшки, соединенные цепью неисчислимых лет, составляющих Время¹⁶.

Рэй Брэдбери. И грянул гром

Эдвард Лоренц (рис. 1.18) составлял прогнозы погоды для авиации США. После Второй мировой войны он продолжал работать по заказам военного ведомства и одним из первых начал использовать математические модели для прогнозирования погоды. В его распоряжении был компьютер LGP-30. Это была новинка, она весила более 300 кг и стоила целое состояние – почти полмиллиона долларов на нынешние деньги. Начинку компьютера составляли сто с лишним радиоламп.

¹⁶ Перевод Л. Жданова.



Рис. 1.18. Эдвард Лоренц (1917–2008) – отец теории хаоса. Само по себе рождение новой теории, не менее важной, чем квантовая механика или теория относительности, из-за ошибки округления можно рассматривать как проявление хаоса в действии

Лоренц описывал состояние атмосферы системой дифференциальных уравнений. Он задавал начальные условия, и компьютер рассчитывал, как будут меняться параметры системы со временем. Однажды он решил повторить расчеты погоды на два месяца вперед и ради экономии времени сделал это не с текущей, а с другой даты и ввел в качестве исходных данных цифры из распечатки, сделанной ранее компьютером. Лоренц с удивлением обнаружил, что машина при повторном вычислении выдала уже другой результат. Причем в первые четыре дня старый и новый график шли одинаково, затем они полностью разошлись. Лоренц не сразу догадался, в чем дело. Результаты выводились на печать с тремя цифрами после запятой, тогда

как компьютер оперировал шестью знаками. Округлив число до третьего знака, Лоренц задал системе новые начальные условия, пусть незначительно, но отличающиеся от прежних. И это мельчайшее различие со временем полностью изменило результат.

Компьютер преподал исследователю урок: если состояние атмосферы описывается подобной системой уравнений, то долгосрочный прогноз в принципе невозможен. И не важно, сколько станций наблюдает за погодой, какие суперкомпьютеры применяются для обработки данных.

Из эксперимента следовали и более общие выводы. Выходило, что система, пусть даже однозначно заданная несколькими уравнениями, может вести себя хаотически. Согласно Лоренцу, *хаосом* называется нерегулярное, случайное поведение систем, в то же время детерминированных по сути. Сам он сформулировал это так (Lorenz, n. d.):

«Хаос – это когда настоящее определяет будущее, но приблизительное настоящее не определяет будущего даже приблизительно».

Коллеги к открытию Лоренца отнеслись скептически (Lorenz, 1963):

«Один метеоролог сказал мне, что если бы теория была верна, то одного взмаха крыльев чайки было бы достаточно, чтобы изменить погоду навсегда. Спор не решен окончательно, но самые последние данные, похоже, говорят в пользу чаек».

Позже Лоренц назвал одно из своих выступлений «Предсказуемость: может ли взмах крыльев бабочки в Бразилии вызвать торнадо в Техасе?». Лоренц не дает прямого ответа на этот вопрос. Метафора же бабочки, сменившей чайку, восходит к рассказу Рэя Брэдбери «И грянул гром». В мезозое гибнет бабочка – и вот уже в современном мире вместо президента-либерала к власти приходит диктатор. Выражение *«эффект бабочки»* принадлежит популяризатору теории хаоса Джеймсу Глейку, автору бестселлера «Хаос. Создание новой науки».

Лоренц в публичных выступлениях любил цитировать стихотворение:

*Не было гвоздя —
Подкова
Пропала.*

*Не было подковы —
Лошадь
Захромала.*

*Лошадь захромала —
Командир
Убит.*

*Конница разбита —
Армия
Бежит.*

*Враг вступает в город,
Пленных не щадя,
Оттого, что в кузнице*

*Не было гвоздя*¹⁷.

Всякий раз Лоренц делал оговорку – в мире хаоса пропавший гвоздь мог бы равновероятно привести и к трагическим, и к счастливым последствиям.

Это стихотворение куда старше теории хаоса – ему несколько столетий. Множество книг и фильмов обыгрывают ситуации, в которых, казалось бы, незначительные события приводят к грандиозным последствиям. Здесь можно вспомнить, например, Аннушку, разлившую подсолнечное масло. Она выступает как проводник хаоса. В то же время сам Булгаков является приверженцем детерминизма, и случайности у него – часть высшего замысла: «Меркурий во втором доме, Луна ушла...», «Кирпич ни с того ни с сего <...> никому и никогда на голову не свалится». И даже если большинство из нас придерживается иной точки зрения и принимает как должное проявления хаоса в повседневности, то в мире физических явлений мы все же не готовы с этим мириться. Еще со школьных задач, в которых поезд идет из пункта А в пункт Б, мы привыкли считать, что строгие, не знающие исключений законы определяют траектории объектов физического мира. Одним из апологетов детерминизма был маркиз де Лаплас. В работе «Аналитическая теория вероятностей» он писал:

«Мы можем рассматривать настоящее состояние Вселенной как следствие его прошлого и причину его будущего. Разум, которому в каждый определенный момент времени были бы известны все силы, приводящие природу в движение, и положение всех тел, из которых она состоит, будь он также достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, смог бы объять единым законом движение величайших тел Вселенной и мельчайшего атома; для такого разума ничего не было бы неясного, и будущее существовало бы в его глазах точно так же, как прошлое».

Позже этот гипотетический разум называли **демоном Лапласа**. Возможно, к своим взглядам Лаплас пришел, исследуя движение планет в Солнечной системе, казавшееся ему образцом гармонии. Маркиз бы, наверное, расстроился, узнав, что и движение планет хаотично.

Теория хаоса положила конец детерминизму. Оказалось, что значительная часть явлений нашего мира в принципе не может быть просчитана наперед. Главный вывод Лоренца в целом неутешителен (Lorenz, 1991):

«К сожалению, признавая систему хаотической, мы не узнаем того, чего хотели. И не можем предвидеть будущего поведения системы. Но этот факт говорит нам о том, что существует граница нашего предвидения, хотя и не известно, где именно она находится. Пожалуй, лучший совет, который может дать нам “теория” хаоса, – не делать поспешных выводов; неожиданности могут быть частью совершенно нормального поведения».

В качестве примера Лоренц рассмотрел (Lorenz, 1963) систему дифференциальных уравнений, упрощенно описывающих конвекцию в атмосфере:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \quad \frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \quad \frac{dz}{dt} = xy - \beta z$$

Здесь x , y , z – переменные, описывающие состояние системы; t – время, независимая переменная; σ , ρ , β – числовые параметры. Каждому состоянию системы для определенного набора параметров σ , ρ , β соответствует набор значений (x, y, z) – точка в трехмерном пространстве. Изменение системы будет описываться трехмерной кривой, известной как **аттрак-**

¹⁷ Перевод С. Я. Маршака.

тор Лоренца (рис. 1.19). Аттрактор Лоренца наглядно демонстрирует поведение лоренцевской системы. В течение длительного времени система ведет себя квазипериодическим образом, а затем без видимой причины неожиданно переходит в другое состояние. В реальном мире подобной модели могут соответствовать два различных состояния климата, переход между которыми происходит резко и непредсказуемо.

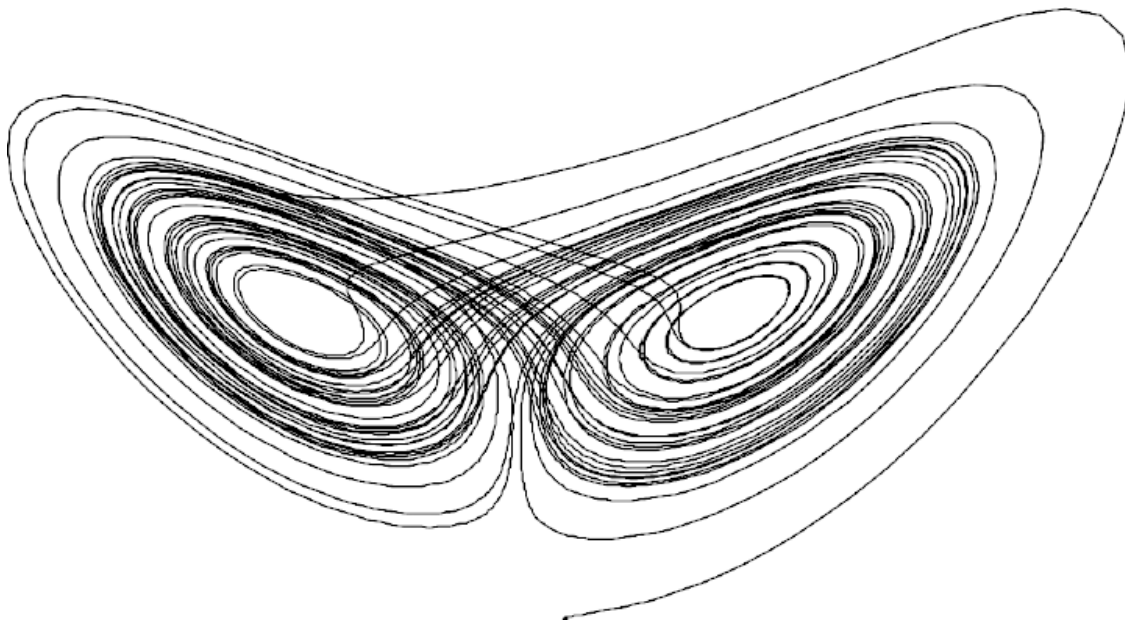


Рис. 1.19. Так выглядит детерминированный хаос. Аттрактор Лоренца – решение приведенных выше уравнений. Система может существовать в двух состояниях, соответствующих двум спиральям, лежащим в разных плоскостях в трехмерном фазовом пространстве. Переход между состояниями происходит относительно нечасто. По форме аттрактор Лоренца напоминает крылья бабочки

«Порой существуют два разных набора состояний, к которым состояние системы в конечном счете сходится, и возмущения, кажушиеся незначительными, как потеря гвоздя, могут быть достаточными, чтобы направить систему по тому или иному пути»

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.