

Содержание

	Список иллюстраций	9
	Предисловие к русскому изданию	11
	Предисловие	31
	Благодарности	36
Глава 1	Увековечено в камне	37
Глава 2	Создание нашей планеты	63
Глава 3	Близкие контакты	80
Глава 4	Первые два миллиарда лет	116
Глава 5	Блуждающие плиты	140
Глава 6	Шаткие основания	165
Глава 7	Горы, жизнь и большой холод	196
Глава 8	Холодные времена	223
Глава 9	Великое потепление	249
Глава 10	Чтение по губам	274
Глава 11	Беспокойные гиганты	298
Глава 12	Плывем, ползем и летим к настоящему	323
Глава 13	Зачем нужна геология	353
	Библиография и рекомендуемая литература	379
	Указатель	389

Список иллюстраций

1. Геохронологическая шкала
2. Осадочные слои на пермско-триасовой границе
3. Внутреннее строение Земли
4. Кратер Барринджера, Аризона
5. Результат удара Тунгусского метеорита, Сибирь
6. Карта кратера Чикшулуб на полуострове Юкатан в Мексике
7. Диаграмма зависимости частоты столкновений и размеров астероидов
8. Астероид Эрос
9. Хронологическая шкала для первых двух миллиардов лет Земли
10. Ископаемые и современные строматолиты
11. Основные литосферные плиты
12. Полосы разной магнитной полярности на океаническом дне
13. Поперечное сечение зоны субдукции
14. Поперечное сечение, показывающее мантию, кору и литосферу
15. Места землетрясений, которые произошли между 1963 и 1998 годами
16. Разлом Сан-Андреас, Калифорния
17. Балансирующий камень, Калифорния
18. Место Сычуаньского землетрясения 2008 года

19. Карта разлома Рилфут на юго-востоке Соединенных Штатов Америки
20. Карта участков коры архейского возраста
21. Временная шкала протерозойского эона
22. Данные по изотопам кислорода для ледяных кернов из Кэмп Сенчури (Гренландия)
23. Данные ледяного керна со станции «Восток» в Антарктиде за 400 тысяч лет
24. Температуры в Гренландии за последние 50 000 лет
25. Пути в геохимическом цикле углерода
26. Данные керна из осадочных пород для палеоэоценового термического максимума
27. Континенты во времена Карибского океанического плато
28. Окаменелости носорогов в Эшфоллском парке ископаемых животных (Небраска)
29. Сравнение выбросов для нескольких крупных извержений
30. Карта кальдер, образованных Йеллоустонской горячей точкой
31. Временная шкала событий фанерозойского эона
32. Биологическое разнообразие при переходе через ордовикско-силурийскую границу
33. Палеокарты для фанерозойского эона

Предисловие к русскому изданию

Возможно, подзаголовок этой книги «Расшифровка прошлого, предвидение будущего» сейчас даже более уместен, чем при появлении оригинального издания на английском языке. Почему? Потому что работа специалистов, изучающих горные породы, океанические и озерные отложения, керны льда, натёчные образования в пещерах и многое другое ради того, чтобы выяснить, как изменялась среда на поверхности нашей планеты в прошлом, имеет первостепенное значение для понимания самой важной проблемы, с которой человечество сталкивается сегодня: изменение климата. Прошлое не всегда является идеальным аналогом будущего, однако исследования такого рода в сочетании с численным моделированием глобального климата дают нам надежду на прогнозирование потенциальных последствий быстрого роста содержания парниковых газов в атмосфере, который является следствием человеческой деятельности, и на появление способов обратить эту тенденцию вспять.

В этом коротком предисловии я остановлюсь на нескольких недавних достижениях, которые помогли нам узнать больше о прошлом и будущем климата нашей планеты, а также выделю другие успехи, достигнутые науками о Земле за последнее десятилетие. Чтобы в полной мере отдать должное всем новым исследованиям в столь

динамично развивающейся области, понадобилась бы целая книга, поэтому мне пришлось проявлять избирательность. По большей части я сосредоточился на исследованиях, тематика которых близка к тому, о чем пойдет речь в основных главах книги.

Начнем с теории тектоники плит, которая с 1960-х годов лежит в основе большей части наших знаний о Земле (см. главу 5). Развитие этой теории привело к осознанию того, что многие явления на поверхности Земли — вулканизм, горообразование, землетрясения и даже состав атмосферы — связаны и между собой, и с процессами, происходящими внутри планеты. В свою очередь, это является основой для понимания Земли как системы, а не как совокупности отдельных, не связанных между собой частей.

Другой вечный вопрос, который кратко рассмотрен в главе 5: когда началась тектоника плит? За последнее десятилетие этой проблеме посвящали множество исследований, и, хотя окончательного ответа по-прежнему нет, диапазон возможных вариантов сузился. Почему так важно знать, когда началась тектоника плит? Потому что понимание этого процесса многое объясняет в том, как Земля функционирует сегодня. Это, в свою очередь, имеет серьезные последствия для понимания того, как наша планета эволюционировала в течение геологического времени. С его помощью мы, вероятно, поймем эволюцию и других планет Солнечной системы. Есть и практические следствия: многие месторождения полезных ископаемых образовались в конкретных тектонических условиях. Знание того, когда начался этот процесс, может помочь нам в их поисках.

Согласно современной теории тектоники плит, несколько относительно жестких участков литосферы планеты (их называют плитами, см. рисунки 11–14) перемещаются относительно друг друга по поверхности

планеты. Океанические плиты в геологических масштабах недолговечны: они образуются в результате магматической деятельности, происходящей вдоль океанических хребтов, и возвращаются обратно в мантию в зонах субдукции (рисунки 12 и 13); в то же время более плавучие участки континентальной литосферы остаются на поверхности. Основной движущий фактор перемещения плит — тяжесть холодных океанических плит, которые опускаются в мантию в зонах субдукции. Это означает, что ключевым индикатором древней тектоники плит является наличие в геологической летописи минералов и горных пород, уникальных для этих зон. Однако у этого подхода есть несколько проблем. Прежде всего, многие древние породы исчезли в результате эрозии и действия самих тектонических сил, поэтому существует риск, что свидетельства необратимо утеряны. Чем дальше в прошлое, тем меньше будет примеров. Далее, большая часть древних пород после образования трансформировалась в результате интенсивных метаморфических процессов, и поэтому характеристики зон субдукции теперь определить затруднительно. Кроме того, мы знаем, что когда-то внутренняя часть Земли была намного горячее, чем сейчас, и, поскольку типы горных пород, сформировавшихся в зонах субдукции, зависят от температуры, то характеристики пород и минералов в современных зонах субдукции могут не в полной мере отражать ситуацию в древние времена.

В главе 5 обсуждается, что возраст самых старых горных пород, которые однозначно образовались в зоне субдукции, составляет чуть менее миллиарда лет. За последние десять лет эти данные не пересматривались, однако постоянное накопление высококачественных химических и минералогических данных по древним породам протерозойского и архейского эонов (рисунок 1)

и значительно выросшие вычислительные возможности компьютеров, позволившие проводить сложное моделирование термальных, механических и петрологических характеристик древней Земли, дали гораздо более четкую картину того, как, вероятно, развивалась тектоника плит. Как здорово, что у нас есть возможность заглянуть с помощью таких моделей на миллионы лет назад и наглядно представить, как функционировала планета на заре своей истории.

Не вдаваясь в детали, я кратко изложу здесь сложившееся представление. В настоящее время принято считать, что при формировании Земли наружная область нашей планеты — до глубины, возможно, нескольких сотен километров — была расплавлена (так называемый магматический океан). Относительно быстро по геологическим масштабам — от нескольких миллионов до 10–20 миллионов лет — сформировалась твердая кора. Однако на нее часто падали крупные каменные объекты из космоса, а через слабые места в коре из все еще горячих недр изливались потоки лавы. Никаких следов этой ранней коры не сохранилось, но в итоге Земля перешла в состояние, которое специалисты называют периодом «тектоники неподвижной*» покрышки», когда литосфера и кора во многом походили на современные, но литосфера была теплее, мягче и характеризовалась либо слабыми горизонтальными перемещениями, либо вообще их отсутствием. Она была, как следует из названия, неподвижной.

С момента своего образования Земля постепенно остывает — в основном за счет внутренней конвекции,

* Имеется в виду отсутствие горизонтальных перемещений. При этом вертикальные перемещения были очень активны. В своих лекциях я называю этот этап «вертикальной тектоникой». — *Прим. науч. ред.*

когда горячая материя мантии движется к поверхности, а более холодный опускается в глубину. Численные модели показывают, что основное различие между тектоникой неподвижной покрывки и тектоникой «мобильной покрывки» (то есть тектоникой плит) связано с тем, как происходит обмен между горячей внутренностью планеты и более холодной литосферой. При современном режиме тектоники плит горячая вулканическая магма извергается в центральной части океанов и на границах плит, образуя новую кору, в то время как более холодные материалы ныряют обратно в мантию в зонах субдукции. Напротив, при режиме неподвижной покрывки на древней Земле этот обмен имел совершенно другую форму. Ученые назвали это процессом «стекания и подъема»: плотные породы из нижней части литосферы «стекали» в мантию, в то время как расплав (магма) от восходящих потоков в мантии поднимался и формировал новую твердую кору и литосферу посредством проникновения и магматической деятельности.

Сценарий «стекания и подъема», конечно же, никто не наблюдал непосредственно, однако численные модели показывают, что он должен был доминировать на ранних этапах истории планеты. Высокие температуры мантии тех времен означали, что субдукция — в том виде, как мы ее сейчас знаем — происходить не могла; литосфера, более горячая и менее жесткая по сравнению с современным состоянием, не была достаточно прочной, чтобы погружаться в мантию в неповрежденном виде. Если бы литосферная плита начала погружаться внутрь Земли, она бы просто разрушилась. Только после того, как Земля потеряла тепло, а мантия остыла, стал возможен переход от тектоники неподвижных покрывок к тектонике плит. Этот переход шел постепенно и длился, возможно, сотни миллионов лет; вполне вероятно, что на краях

первых сформировавшихся континентов происходила какая-то локальная мелкомасштабная субдукция — еще до возникновения современной глобальной системы тектоники плит.

Более подробную информацию об этих исследованиях можно найти в двух недавних обзорных статьях Палина и др., Брауна, Джонсона и Гардинера (см. библиографию в конце книги).

Вторая область, где за последнее десятилетие достигнут существенный прогресс, касается влияния на нашу планету внеземных объектов. Этой теме посвящена Глава 3, в которой рассказывается о некоторых хорошо известных столкновениях, зафиксированных в геологической летописи, а также об усилиях по обнаружению околоземных объектов, которые потенциально в будущем могут столкнуться с Землей.

Ударное кратерообразование — основной процесс, формирующий ландшафт наших твердых соседей по Солнечной системе — Луны, Меркурия, Венеры и Марса. Космические тела барабанили и по Земле, однако на нашей динамичной планете эрозия, накопление осадков и тектоническая деятельность стерли или скрыли многие кратеры, появившиеся в течение миллионов и миллиардов лет. Однако 15 февраля 2013 года мы получили недвусмысленное напоминание о том, какой вред могут нанести планете космические гости: в атмосферу недалеко от Челябинска (Россия) влетел относительно небольшой астероид (примерно 20 метров в диаметре). Он разрушился на высоте примерно 30 километров: ударная волна разбила окна, слегка повредила сооружения и сбила находившихся на улице с ног. Кратковременная, но яркая вспышка оставила легкие «солнечные ожоги» на лицах некоторых очевидцев. Неудивительно, что в последние годы люди стали активнее искать около-

земные объекты, которые представляют потенциальную опасность для нашей планеты, а также разрабатывать методы предотвращения таких столкновений.

Одним из наиболее впечатляющих достижений в сфере исследований ударного кратерообразования стал совместный проект Международной программы по исследованию океанов и Международной программы континентального научного бурения: в апреле и мае 2016 года ученые провели бурение в ударном кратере Чикшулуб в Мексике. Как рассказывается в Главе 3, этот кратер диаметром в двести километров образовался примерно 66 миллионов лет назад, и эту катастрофу связывают с массовым вымиранием*, знаменующим границу между меловым и палеогеновым периодами на геологической шкале (одновременно это граница между мезозойской и кайнозойской эрами; рисунок 1). Хотя в то время вымерли многие виды, больше всего известно исчезновение с лица Земли динозавров.

По кернам, извлеченным во время бурения, ученые смогли с потрясающей детализацией реконструировать события первых минут и часов после удара. Одна из статей, описывающих эти наблюдения, называется «Первый день кайнозойской эры» (см. библиографию в конце книги).

Уникальная характеристика кратера Чикшулуб — находящееся внутри него приподнятое кольцо из каменистого материала, которое расположено концентрично

* Альтернативным объяснением массовых вымираний являются очень крупные магматические события на Земле. 68–65 млн лет назад сформировалось огромное вулканическое плато Декан (Северная Индия) площадью около 1,5 млн км². Дискуссия между сторонниками вулканической или метеоритной причины массовых вымираний пока далека от завершения. — *Прим. науч. ред.*

с краем кратера. Такой объект называют «пиковым кольцом», и Чикшулуб — единственное место на Земле, где обнаружено подобное кольцо — хотя такие формации нередко встречаются внутри крупных кратеров на Луне, Марсе, Венере и Меркурии. Ученые пробурили пиковое кольцо непосредственно, и взятые образцы позволили выяснить, как оно образовалось. Во время удара уровень океана был намного выше современного, и место столкновения с астероидом полностью находилось под водой*. Врезавшееся тело мгновенно испарило морскую воду; оно также испарило, расплавил и выбросило вверх нижележащие слои осадочных горных пород, а с ними и подстилающие породы фундамента (в основном гранит). В результате образовался кратер. В течение нескольких секунд и минут после удара огромный объем встряхнутых и сильно раздробленных подстилающих пород образовал центральное поднятие (точно такое же поднятие в центре вы могли видеть при покадровой съемке падения капли дождя на поверхность воды), а затем эта масса рухнула обратно в кратер и образовала пиковое кольцо вокруг центра. Почти одновременно с этим в течение следующих минут толстым слоем по дну кратера стали разливаться расплавленные ударом породы. Образцы кернов показывают, что и пиковое кольцо они накрыли слоем примерно 25-метровой толщины. Над этими расплавленными породами находится еще более толстый слой из беспорядочных обломков и частиц расплавленной и нерасплавленной породы, которая называется суевит; некоторые из этих фрагментов оказались здесь в течение первых хаотических десятков минут после удара, а остальные — в те часы, когда море

* Сейчас кратер Чикшулуб расположен наполовину в море, наполовину на полуострове Юкатан в Мексике. — *Прим. пер.*

снова хлынуло в кратер, неся обломки с собой. Мощные волны цунами, порожденные ударом, отразились от близлежащих массивов суши и вернулись к кратеру, принеся еще больше обломков, часть которых были захвачены на этих массивах. В тот первый день кайнозойской эры образовался слой суевита толщиной более ста метров. В его верхней части обнаруживаются куски угля и органические соединения, порожденные сгоревшими наземными растениями: это прямое доказательство того, что удар астероида привел к лесным пожарам. Эти и другие данные, полученные при изучении взятых в Чикшудубе кернов, подтверждают и даже обнаруживают еще более кошмарные последствия столкновений по сравнению с известными из более ранних исследований. Они подчеркивают, что нам нужно со всей серьезностью отнестись к той угрозе, что несут человечеству околоземные объекты, которые потенциально могут столкнуться с нашей планетой.

Как обсуждается в главе 3, реальная возможность столкновений крупных внеземных объектов с Землей привела к созданию разнообразных международных программ по отслеживанию этих объектов и взятию образцов вещества с некоторых из них. На момент написания этих строк в октябре 2021 года ученые идентифицировали свыше 27 тысяч околоземных объектов, и каждую неделю их количество увеличивается. Только в 2020 году было обнаружено более 2200 новых астероидов, приближающихся к нашей планете. По оценкам, сегодня обнаружено свыше 90% околоземных объектов размером свыше километра, и теперь внимание ученых сосредоточено на более мелких астероидах размером более 140 метров. Для каждого открытого объекта по возможности вычисляется орбита, после чего можно оценить вероятность его столкновения с Землей. У некоторых астероидов уче-

ные исследовали спектральные характеристики, получив информацию об их химическом и минералогическом составе. Это не только дает ключ к пониманию их происхождения, но имеет и практическое значение: если некий объект будет признан угрозой, то знание его физических и химических свойств окажется крайне важным для разработки методов его отражения.

Еще лучше взять образцы вещества напрямую. Как описывается в главе 3, японский космический аппарат «Хаябуса» опустился ненадолго на астероид Итокава и вернулся на Землю в 2010 году с небольшим количеством материала, взятого с его поверхности. После этого аппарат «Хаябуса-2» посетил еще один околоземный астероид, Рюгу, и собрал вещество с его поверхности; в декабре 2020 года эти образцы попали на Землю. Также в 2020 году американская межпланетная станция OSIRIS-REx села на астероид Бенну и взяла пробы вещества; по новым оценкам, его количество существенно больше, чем обнаруживалось предыдущими экспедициями*. Сейчас станция летит на Землю; прибытие запланировано на сентябрь 2023 года. Эти миссии стали удивительным достижением инженерной мысли, а собранные образцы вещества астероидов должны помочь нам узнать больше о природе околоземных объектов.

Одним из самых ожидаемых полетов к околоземным астероидам является путешествие американского аппарата DART (название — аббревиатура слов Double Asteroid Redirection Test, то есть испытания перенаправления двойного астероида) к двойному астероиду Дидим. Цель этой миссии — выяснить, может ли столкновение кос-

* Бенну выбран как раз потому, что теоретически представляет угрозу для нашей планеты (вероятность его столкновения с Землей в 22 веке оценивается в 1/4000). — *Прим. пер.*

мического аппарата с астероидом помешать встрече космического тела с нашей планетой.

Астероид Дидим — на самом деле пара объектов, движущихся по одной орбите: более крупный имеет в диаметре три четверти километра, а его спутник Диморф — около 160 метров. DART, запуск которого запланирован на ноябрь 2021 года, должен достичь этой пары в сентябре 2022 года*. План состоит в том, чтобы врезаться космическим аппаратом в Диморф на высокой скорости (6,6 километра в секунду), а потом пронаблюдать за изменением его орбиты вокруг более крупного компонента с помощью наземных телескопов. Согласно прогнозу, отклонение будет небольшим, но заметным. В случае успеха попадание в такую крохотную цель на расстоянии 11 миллионов километров от Земли станет еще одним выдающимся достижением человеческой техники. Это также окажется первым шагом на пути к защите человечества от разрушительного удара, подобного тому, который создал кратер Чикшулуб и вызвал вымирание примерно половины всех видов, живших тогда на земле.

Удары внеземных объектов — не единственное явление, связанное с массовыми вымираниями. В главе 10 рассказывается, что с вымираниями совпадали извержения в так называемых крупных магматических провинциях (КМП). Во всех случаях предполагаемая причина вымирания — выброс в атмосферу огромного количества парниковых газов от лавы; это вызывает повышение температуры, увеличение кислотности океана, снижение содержания кислорода в морской воде и, возможно, иные последствия для среды. Проблема здесь в том, что

* Запущенный 24 ноября 2021 года, аппарат должен столкнуться с Диморфом в конце сентября-начале октября 2022 года. — *Прим. пер.*

примерное совпадение по времени извержений КМП и массового вымирания еще не доказывает причинно-следственную связь между ними. Более того, массовые исчезновения видов происходят резко и быстро по геологическим меркам, в то время как извержения КМП могут происходить гораздо большее время и включать отдельные интервалы вулканической активности, перемежаемые относительно долгими (тысячи лет) периодами покоя.

Большая часть исследований связи между КМП и вымираниями, проведенных за последнее десятилетие, сосредоточена в трех областях: 1) получение более точной хронологии — и для летописи окаменелостей при вымираниях, и для извержений КМП; 2) разработка новых косвенных показателей (измеримых величин, которые отражают параметры среды, например, температуру) для отслеживания меняющихся условий среды во время вымираний; 3) разработка новых более точных численных моделей для таких меняющихся условий.

Возможно, лучше всего эти подходы иллюстрируют исследования Сибирских траппов (одной из крупнейших магматических провинций планеты) и связи с пермско-триасовым массовым вымиранием — самым смертоносным событием в геологической летописи (тогда погибло более 90% морских видов и 75% наземных; см. главу 10). Решающее значение для такой работы имеет детально проработанная геохронология. Измерения, проведенные в одной лаборатории с использованием одних и тех же методов (что устраняет искажения, связанные с различными условиями разных лабораторий), четко показывают взаимосвязь между временем вымирания и вулканической деятельностью КМП. Если коротко, то датирование осадочных слоев показывает, что пермско-триасовое вымирание началось 251,941 миллио-

на лет назад (обратите внимание на точность этого числа!) и длилось недолго, не более 60 тысяч лет. Напротив, вулканическая деятельность Сибирских траппов продолжалась примерно миллион лет*. Кроме того, масштабные излияния лавы начались примерно за 300 тысяч лет до вымирания. Такие наблюдения приводят к очевидному вопросу: что же послужило спусковым механизмом вымирания?

На этот вопрос удалось ответить благодаря тщательному изучению того, как развивалась магматическая активность во время излияния Сибирских траппов. Геохронологические исследования показывают, что в течение 300 тысяч лет — то есть до вымирания — основная активность была представлена излияниями поверхностных потоков лавы. Хотя их общий объем сложно оценить, слои этих потоков достигали толщины в несколько километров и, вероятно, выбрасывали в атмосферу значительное количество парниковых газов. Однако летопись окаменелостей показывает, что биологическая реакция при этом была незначительной или вовсе отсутствовала. Затем — возможно, в ответ на увеличившуюся нагрузку со стороны вышележащих лав — поверхностная вулканическая активность прекратилась. Расплавленный материал из мантии продолжал подниматься в кору, однако доминантной формой магматизма стало появление силлов — крупных плоских тел магмы, которые не доходили

* Восстановление детальной хронологии излияний Сибирских траппов еще далеко от завершения, несмотря на существенный прогресс в последние годы. Точность современных геохронологических методов пока недостаточна для разделения интервалов в десятки тысяч лет при возрасте 251 млн лет. Однако эти методы развиваются стремительно, что позволяет надеяться на решение вопроса в ближайшие десятилетия. — *Прим. науч. ред.*

до поверхности, а простирались горизонтально по осадочным породам, подстилавшим поверхностные потоки лавы. Некоторые силлы достигают 350-метровой толщины, а их общий объем во всей провинции оценивается в два с лишним миллиона кубических километров.

Хронологические исследования показывают, что начало образования силлов точно соответствует началу пермско-триасового вымирания. Сибирские траппы формировались в Тунгусском бассейне — регионе, который в то время был покрыт толстыми слоями осадочных пород, включая эвапориты, карбонаты и уголь — как раз те породы, которые выделяют огромное количество летучих парниковых газов, если их станут нагревать и видоизменять появившиеся силлы. Последовало быстрое глобальное потепление. С помощью показателей, которые можно использовать для расчета температуры морской воды, исследователи выявили, что в экваториальных зонах температура воды на поверхности достигала 40 °С — величины, смертельной для многих видов животных. Наземные температуры были еще выше. Другие ученые использовали другой показатель — количество изотопов лития в океанических отложениях — чтобы продемонстрировать, что в это время шло интенсивное химическое выветривание континентов. Вывод был таков: значительно увеличившаяся концентрация углекислого газа в атмосфере приводила к выпадению кислотных осадков, быстро разрушавших поверхностные породы.

Если рассмотреть совместно результаты недавних исследований по хронологии магматизма Сибирских траппов и измерения различных косвенных показателей для интервала вымирания, то они убедительно подтверждают, что появление силлов в осадочных породах Тунгусского бассейна вызвало массовое выделение парниковых газов в атмосферу. Это привело к быстрому, интенсив-

ному глобальному потеплению и длинному списку побочных эффектов, что в совокупности и обеспечило самое массовое вымирание в геологической летописи. Предполагаемое количество выброшенных парниковых газов намного превышает тот объем, который вырабатывает человечество сегодня. Тем не менее, этот катастрофический эпизод из прошлого Земли может послужить отрезвляющим напоминанием о хрупкости среды на нашей планете.

Читателям, заинтересовавшимся этими исследованиями, можно предложить познакомиться с работами Берджесса, Мюрхеда и Боуринга; Хе Суня и др.; Клэпхэма и Ренне (см. библиографию в конце книги).

Парниковая Земля во времена пермско-триасовой границы находится на одном краю спектра температур. На противоположном краю спектра располагаются ледниковые периоды, когда планету сковывал холод. Особо следует отметить интервал времени в конце протерозойского эона — примерно между 850 и 630 миллионами лет назад — который называется криогением (см. рисунок 21). Именно в это время Земля пережила два продолжительных периода экстремального холода, когда ледники простирались до тропиков, а океаны, возможно, были полностью покрыты льдом (состояние Земли-снежка).

Десять лет назад, когда эта книга была впервые опубликована, теория Земли-снежка вызывала споры. Но благодаря новым исследованиям эта идея получила широкое признание. Как и в случае обсуждавшегося выше пермско-триасового вымирания, ключевым элементом здесь стали новые точные измерения возраста и тщательный учет геологических условий для образцов, использованных для датировки. Данные показывают, что первое состояние Земли-снежка длилось более 55 миллионов лет, с 717 до 660 миллионов лет назад; второй эпизод

был короче — примерно с 641 по 635 миллионов лет назад. Крайне важно отметить, что измерения на всех континентах и по всему криогению показывают: начало и окончание ледниковых событий были синхронными на всех континентах, и только в этих двух интервалах существуют отложения, типичные для ледникового периода.

Новые исследования подтверждают, что условия Земли-снежка были экстремальными. Например, ученые детально сравнили ледниковые отложения, появившиеся во времена Земли-снежка и во время недавних ледниковых периодов (в частности, плейстоценового ледникового периода, описанного в главе 8). Они обнаружили, что отложения Земли-снежка накапливались чрезвычайно медленно — в десять и более раз медленнее, чем это было во времена более поздних ледниковых периодов; а это означает экстремальные и продолжительные холод и сухость. Они подчеркивают уникальную природу этих промежутков времени: по их словам, скорость накопления гляциальных отложений в состоянии Земли-снежка была самой медленной в истории планеты.

В главе 7 мы коснемся предположений ученых о том, что состояние Земли-снежка всякий раз резко заканчивалось, когда вулканический углекислый газ вызывал глобальное потепление. Недавние исследования наземных ледниковых отложений на Шпицбергене в Арктике подтвердили этот вывод, хотя тут есть тонкость. Специалисты, участвовавшие в этой работе, провели детальное обследование осадочной толщи, отложившейся в конце второго эпизода Земли-снежка (примерно 635 миллионов лет назад). В то время Шпицберген располагался в тропиках. Они обнаружили, что отложения говорят не об одном резком отступлении ледников, а о целой серии отступлений и наступлений, напоминающих циклы

Кроля–Миланковича для плейстоценового ледникового периода (см. главу 8). Моделируя поведение низкоширотных ледяных щитов при различных сценариях, они смогли показать, что параметры орбиты, которые влияют на количество солнечной энергии, попадающей на Землю, и являются причиной циклов Кроля–Миланковича, могли воздействовать и на ледники Земли-снежка во времена относительно быстрого перехода между ледниковыми условиями и последующим парниковым климатом. Таким образом, модели подтвердили то, что, по видимому, демонстрировали и полевые данные: эпизод Земли-снежка закончился не внезапным переключением в теплое состояние, а сложным переходным периодом, в течение которого мировые температуры повышались и понижались под влиянием параметров орбиты планеты.

Подробнее об этих исследованиях можно прочитать в работах Бенна и др., Руни и др., Макленнана и др., Крокфорда и др. (см. библиографию в конце книги).

Наконец, мы подошли к вопросу об антропогенном изменении климата (глава 13). Почти наверняка это та область наук о Земле, в которой за последнее десятилетие достигнуты наиболее масштабные успехи — в первую очередь за счет разработки и уточнения косвенных показателей, которые могут отслеживать различные параметры окружающей среды в разные моменты прошлого Земли, а также за счет развития и уточнения климатических моделей, что стало возможным благодаря повышению вычислительных мощностей компьютеров. Эти показатели позволяют нам оценивать, как планета реагировала на прошлые экстремальные климатические условия, а с помощью итеративного процесса сравнения результатов моделирования с данными косвенных показателей мы получили возможность более точно определять процессы и механизмы, которые контролировали

изменения климата в прошлом. Это, в свою очередь, привело к увеличению уверенности в прогнозах климата в будущем при различных сценариях выбросов парниковых газов — в некоторых случаях вплоть до регионального уровня.

Климатологи более пятидесяти лет пишут об антропогенном глобальном потеплении. Однако наука продвигается вперед, уточняя предыдущие исследования, совершенствуя процедуры и обнаруживая недостатки в предыдущих рассуждениях, поэтому к прогнозам и категорическим утверждениям ученые проявляют естественную настороженность. В результате до недавнего времени большинство климатологов с большой осторожностью связывали экстремальные погодные явления с антропогенным глобальным потеплением. Но все меняется. Сейчас газеты, телевизор и интернет регулярно бомбардируют нас историями о наводнениях, лесных пожарах, аномальной жаре и засухах, приводя при этом слова специалистов, что главным фактором тут является влияние человека на климат. Связь устанавливается обычно в виде вероятностных, а не абсолютных утверждений, однако идея ясна: по мере того, как планета нагревается, такие экстремальные события становятся все более вероятными.

В 1988 году Организация Объединенных Наций создала Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК), поставив перед ней задачу оценки рисков антропогенного изменения климата и создания докладов по этим вопросам. В настоящее время группа представляет 195 стран. Сейчас она завершает свой шестой доклад, который предполагается опубликовать до конца 2022 года. Как и предыдущие доклады, он охватывает работы тысяч ученых по всему миру и обеспечивает политикам и общественности понимание изменений в климате, вызванных деятельностью человека.

Одна из рабочих групп, участвовавших в этой работе, уже опубликовала свой раздел доклада в виде проекта. Он называется «Изменения климата 2021: физические основы» и базируется на исчерпывающем обзоре последних климатических моделей, рецензируемых исследований и палеоклиматических данных. В начале документа авторы делают следующий вывод: *«Несомненно, человеческая деятельность разогрела атмосферу, океан и сушу. Произошли масштабные и быстрые изменения в атмосфере, океане, криосфере и биосфере»*. Через несколько страниц отмечается, что *«перемены, вызванные человеческой деятельностью, уже сказываются на многих погодных и климатических экстремальных явлениях во всех регионах мира»*. Заключение из этого отчета, особенно касающиеся возможных вариантов климата в будущем, в значительной степени опираются на те разновидности числовых моделей и данных из прошлого нашей планеты, которые обсуждались в этом предисловии. Когда в августе 2021 года появился этот документ, британская газета *The Guardian* назвала его «самым явным предупреждением... о серьезных, неизбежных и необратимых изменениях климата», сделанным МГЭИК.

Частота экстремальных погодных явлений за последние годы продолжает расти, и в результате реальность перемен в климате стала очевидной для всех. Недавние исследования (в том числе вошедшие в доклад МГЭИК) устанавливают связь климата и антропогенной деятельности так прочно, что правительства разных стран с запозданием начинают замечать проблему. Когда я пишу это предисловие, в шотландском городе Глазго вот-вот начнется крупная международная конференция по климату — COP26. В ней примут участие почти 140 мировых лидеров, тысячи ученых, бизнесменов, государственных деятелей и других лиц. Цели грандиозны. Среди

них — добиться нулевых выбросов углерода к середине XXI века. Если это удастся сделать, то можно будет предотвратить некоторые ужасные последствия, предсказываемые климатическими моделями при сохранении текущего положения дел.

Когда я пишу эти строки в октябре 2021 года, на острове Ла Пальма извергается вулкан Кумбре-Вьеха; пепел и лава безжалостно уничтожают дома и всю местность. Это пример деятельности нашей динамичной планеты, и пострадавшие мало что могут сделать — разве что покинуть зону бедствия. Однако когда речь идет о других явлениях — например, столкновениях с околоземными объектами или изменениях климата, — мы должны применить свой научный опыт и технические возможности во избежание наихудших сценариев, и для этого нужно проявить политическую волю. Вулкан на острове Ла Пальма — напоминание, что Земле нет дела до нас. Но нам есть дело до своей планеты. Мы должны заботиться о ней.

Дуг Макдугалл

*Эдинбург, Шотландия
Октябрь 2021*

Предисловие

Земля — не осколок мертвой истории, не пласты, слежавшиеся, как листы в книге, интересные для одних лишь геологов и антиквариев; это — живая поэзия, листы дерева, за которыми следуют цветы и плоды; она — не ископаемое, а живое существо.

*Генри Дэвид Торо,
«Уолден, или Жизнь в лесу»**

В этом отрывке Торо непреднамеренно коснулся того, что геологи и другие ученые, изучающие Землю, осознавали давно, и что в последние годы становится все более важным для понимания нашей планеты: Земля не статична, она динамична и постоянно изменяется. Она не живая в полной мере, но ее части непрерывно взаимодействуют друг с другом, и это обуславливает колоссальные перемены, происходящие с планетой на протяжении истории. Один из способов «прочитать» ее — как у Торо, по пластам, подобным листам в книге; но есть и другие способы, которые появятся в последующих главах.

«История повторяется» — это выражение, которое обычно используют, чтобы напомнить нам: изучая историю, мы можем избежать ошибок прошлого. Это может

* Перевод З. Е. Александровой. — *Прим. пер.*

быть правдой — по крайней мере, иногда. И тем не менее существуют люди — например Нассим Талеб, автор «Черного лебедя» — которые утверждают прямо противоположное: история отнюдь не является хорошим путеводителем по будущему, а мир сформирован событиями исключительными и не имеющими прецедентов — а потому в основном непредсказуемыми. Но даже сторонники этой точки зрения не считают, что нам следует становиться фаталистами, а полагают, что нужно научиться ожидать неожиданного. Но если так, то стоит ли вообще изучать историю?

В случае Земли ответить просто, поскольку только знание прошлого нашей планеты дает возможность предвидеть ее будущее. Да, Природа может столкнуть нас с неожиданностями: жестокой бурей, разрушительным землетрясением, цунами или падением астероида. Однако неожиданными они являются только потому, что редко происходят на нашей памяти. Но на протяжении истории Земли эти события случались многократно, и они подчиняются законам физики и химии. Вот почему так важно расшифровать прошлое Земли: в будущем будут действовать те же самые физические и химические принципы, которые управляли нашей планетой с момента ее образования. История в самом деле повторится — если не в деталях, то хотя бы в общих чертах. Студентов-геологов часто учат, что настоящее — ключ к прошлому. Однако специалисты, изучающие Землю, также понимают, что во многих отношениях прошлое — это ключ к будущему.

Земля существует очень давно — 4,5 миллиарда лет. Этот огромный промежуток времени трудно вообразить, однако при таком количестве времени даже геологические процессы, которые идут со скоростью улитки — например эрозия гор или движение литосферных

плит — в конечном итоге приведут к огромным переменам на планете. Пусть через миллионы лет, но Альпы превратятся в равнину, а Лос-Анджелес проскользнет мимо Сан-Франциско, направляясь на север вдоль разлома Сан-Андреас.

Над такими прогнозами интересно размышлять, однако ясно, что это дело отдаленного будущего. Этого не увидят ни читатели этой книги, ни их правнуки. С гораздо большей вероятностью мы столкнемся с последствиями некоторых имеющих отношение к геонаукам проблем, о которых слышим ежедневно: наводнения, ураганы, извержения вулканов, вырубка лесов, исчезновение видов, нехватка полезных ископаемых — список можно продолжать. А ведь я еще не упомянул о самом важном — изменении климата. Проблема в том, что большинство людей, не знакомых с науками о Земле, не имеют четкого представления о том, как работают процессы, затрагивающие нашу повседневную жизнь и наше будущее. Это верно даже в отношении многих из тех людей, которые должны управлять реакцией общества на такие проблемы. К сожалению, наукам о Земле в системе образования обычно уделяют мало внимания. Например, по данным Американского геологического института, в Техасе — штате, где геонауки весьма важны для экономики — курс наук о Земле есть всего у двух процентов девятиклассников. Для биологии этот показатель составляет 95 процентов. Я надеюсь, что эта книга хоть в какой-то степени стимулирует у читателей интерес к геологии и поможет улучшить ситуацию.

Поскольку знание прошлого Земли — весьма важная составляющая понимания того, как наша планета работает сегодня и будет работать в будущем, эта книга, помимо рассказа о конкретных темах — например, землетрясениях и ударах астероидов — рассматривает в хро-

нологическом порядке некоторые важные события, которые влияли на Землю за последние 4,5 миллиарда лет. Главы, посвященные истории Земли, чередуются с главами, посвященными конкретным событиям и процессам; я надеюсь, что такое построение книги, пусть оно и не традиционно, окажется и полезным, и интересным. Я старался по возможности не вязнуть в сложных научных дискуссиях, но при этом все же придерживаться основных идей обсуждаемых исследований.

XXI век — захватывающее время для специалистов по геонаукам. Типичный, стереотипный геолог, карабкающийся на гору с геологическим молотком, все еще существует — и играет важную практическую роль. Однако к молотку теперь добавляется обильный инструментарий, который позволяет изучать Землю и Солнечную систему с беспрецедентной детализацией: спутники, суперкомпьютеры, электронные микроскопы, масс-спектрометры, системы беспроводной связи, подводные аппараты и космические корабли — и это далеко не все. Одним из астронавтов, побывавших на Луне, был геолог Харрисон Шмитт (он привез на Землю образцы горных пород). Специалисты, изучающие Землю, постоянно спускаются на многокилометровые глубины в батискафах, надевают защитную одежду, чтобы взять пробы газов, выделяющихся из действующих вулканов, отправляют автономные дрейфующие буи собирать данные в океанах, или бросают вызов опасностям Антарктики, добывая ледяные керны, чтобы получить данные о климате прошлых эпох. Некоторые работают в чистых лабораториях с такими крохотными образцами, что одна частичка пыли или отпечаток пальца могут испортить анализ; другие загружают собранные данные в суперкомпьютеры, чтобы создать трехмерные изображения различных частей Земли. Многие из этих людей не станут ав-

томатически причислять себя к геологам — они изучали не только геологию, но и математику или океанографию. Однако все они вносят свой вклад в междисциплинарное изучение прошлого, настоящего и будущего нашей планеты. Именно в этом смысле используется слово *геология* в названии этой книги: геология — это изучение Земли в широком смысле.

Поводом к написанию этой книги отчасти послужило желание поделиться тем, что геологи узнали о нашей потрясающей планете за последние десятилетия. Другим источником была моя убежденность в том, что геоисследования действительно важны для нашего будущего. Надежное управление водными, минеральными и энергетическими ресурсами, защита биологического разнообразия, планирование изменений климата и геологических рисков — все это зависит от того, насколько мы понимаем устройство Земли как системы и ее реакции на различные условия в прошлом. Я надеюсь, что моя книга донесет эту идею и в то же время даст представление о том, как ученые стремятся к этому пониманию.

Благодарности

Появлению этой книги способствовали многие люди. Я особенно благодарен двум рецензентам первоначальной рукописи, профессорам Ричарду Коуэну и Эрнесту Зебровски, которые сделали множество ценных замечаний, обнаружили ошибки и в целом указали на способы сделать книгу более привлекательной. Блейк Эдгар и Дор Браун из издательства Калифорнийского университета усердно старались, чтобы рукопись соответствовала их высоким редакционным стандартам. Все оставшиеся недостатки — исключительно моя вина.

Мой агент Рик Балкин, как всегда, оказывал неоценимую поддержку и давал полезные советы на протяжении всей работы — от идеи до итоговой рукописи. Я уверен, что текст книги значительно улучшают фотографии, которые любезно предоставили Абигаиль Олвуд, Рик Отто, Джим и Ребекка Брюн. Я также благодарен Геологической службе США и НАСА за их политику «открытого использования»; этим организациям принадлежат несколько изображений, использованных в книге. Спасибо также Рону Блейки за разрешение использовать его палеокарты в качестве основы для нескольких иллюстраций, а также Зигфусу Джонсену и Центру льда и климата Института Нильса Бора за разрешение воспроизвести диаграмму из книги Вилли Дансгора «Замороженные анналы».

ГЛАВА 1

Увековечено в камне

В 1969 году, когда я учился в Калифорнии, астрологи, ясновидящие и проповедники запустили волну предсказаний о разрушительном землетрясении, после которого штат (или, по крайней мере, большая его часть) уйдет под воду. Провидцы утверждали, что это произойдет в апреле, хотя согласия насчет точной даты не было. Некоторые люди отнеслись к этой новости очень серьезно, продали свои дома и переехали в другое место. Другие, не такие осторожные, просто искали место повыше 4 апреля — в день, когда предсказатели обещали эту катастрофу. Карикатуристы и газетные обозреватели вволю повеселились, высмеивая страхи перед землетрясением, а для нас, студентов-геологов, эта кутерьма казалась не только забавной, но и несколько странной. В полиции, пожарных частях и на геологических факультетах университетов раздавались тысячи тревожных звонков от нервных граждан. Рональду Рейгану, тогдашнему губернатору штата, пришлось объяснять, что его отпуск за пределами штата был запланирован заранее и никакого отношения к землетрясению не имеет. Мэр Сан-Франциско запланировал «антисейсмическую» вечеринку на 18 апреля — в шестьдесят третью годовщину крупного землетрясения в Сан-Франциско в 1906 году. Он заверил общественность, что вечеринка состоится на суше.