

Предисловие

АЛЕКСЕЙ ЕКАЙКИН,

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

ОЛЬГА БЫЧКОВА,

Европейский университет в Санкт-Петербурге

Печи мира сейчас сжигают около 2 миллиардов тонн угля в год. При сгорании, соединяясь с кислородом, он ежегодно добавляет в атмосферу около 7 миллиардов тонн углекислого газа. Воздушное одеяло, укутывающее Землю, становится более теплым, и ее температура повышается. Этот эффект может стать значительным через несколько столетий

(Popular Mechanics. 1912. 3)

О климате можно наверняка сказать одну вещь — он меняется. За последние полмиллиона лет пять раз холодные эпохи (ледниковые периоды) сменялись теплыми межледниковьями. Внутри этих холодных и теплых эпох были более короткие колебания температуры с периодом в несколько тысяч лет, на фоне которых происходили еще более краткие осцилляции длиной в столетия и десятилетия.

Так почему же нынешнее потепление привлекает такое внимание ученых, политиков и всего общества? На то есть несколько причин.

Во-первых, его скорость беспрецедентна по меркам последних сотен тысяч лет. Для примера: при переходе от последнего оледенения к нынешнему межледниковью (голоцену), который длился порядка 10 тыс. лет, температура Земли повысилась примерно на 3.5 °С — т. е. средняя скорость потепления составляла 0.035 °С за столетие. Сейчас же темпы роста температуры примерно в 40 раз выше — 1.5 °С за столетие.

Во-вторых, сами значения температуры тоже необычно высоки. Как отмечено в 6-м оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата, мы живем в самую теплую эпоху по крайней мере за последние 120 тыс. лет.

Наконец, причиной современных изменений климата считается влияние деятельности человека (антропогенного фактора), в отличие от всех предыдущих (до середины XIX в.) климатических колебаний, причины которых априори были чисто природными, поскольку человеческая цивилизация либо тогда еще не вошла в индустриальную фазу своего развития, либо не существовала вовсе.

Что влияет на изменение климата

Давайте рассмотрим, какие факторы определяли климат нашей планеты в недавнем и далеком прошлом. В масштабе миллионов и десятков миллионов лет «первую скрипку» играют процессы тектоники (движения литосферных плит) и орогенеза (роста гор), которые определяют соотношение площади суши и моря, конфигурацию морских течений, соотношение количества суши в экваториальных и полярных районах, углеродный баланс планеты. В масштабе десятков и сотен тысяч лет основным фактором становится периодическая изменчивость орбитальных параметров нашей планеты — так называемые циклы Миланковича, о которых будет рассказано в разных главах этой книги. Механизм влияния относительно слабых орбитальных колебаний на климат Земли весьма сложен и включает в себя целый комплекс обратных связей, в которых участвуют ледники, океан и парниковые газы атмосферы. В масштабе от десятков лет до нескольких тысяч лет — а именно этот масштаб климатической изменчивости интересует нас в первую очередь — в основном задействована солнечная и вулканическая активность, а также относительно незначительные колебания концентрации парниковых газов, в первую очередь углекислого газа и метана. Наконец, в масштабах года на первый план выходит внутренняя случайная изменчивость климата, обусловленная синоптическими процессами в атмосфере и океане (это обсуждается в главах 1 и 2).

Все эти факторы действуют одновременно, но если мы говорим о современных изменениях климата, то длинными и медленными колебаниями (тектоникой и циклами Миланковича) мы можем пренебречь, они не успевают проявить себя в масштабах десятков и даже сотен лет.

Человеческая деятельность ускоряет или замедляет действие некоторых природных факторов и добавляет целый набор новых. Чаще всего в контексте современного потепления вспоминают эмиссию парниковых газов в результате выработки энергии, промышленного производства, сельского хозяйства и землепользования. Но на самом деле список этих факторов весьма обширен. Помимо парниковых газов и малых примесей человек выбрасывает в атмосферу большое количество аэрозоля — микроскопических частичек вещества. Некоторые из них (например, черный углерод — сажа) нагревают Землю, другие (такие, как оксиды серы) — охлаждают, но в целом, как считается, аэрозоли примерно на треть снижают скорость глобального потепления. Человек меняет альбедо (отражательную способность) поверхности планеты, которая за счет этого чуть меньше поглощает солнечного тепла. Человек производит вещества, которых не было в природе и которые также включаются в работу климатической системы. Например, фреоны, которые одновременно и снижают концентрацию стратосферного озона (что влияет на

циркуляцию атмосферы в полярных широтах), и сами являются мощными парниковыми газами. Даже инверсионные следы самолетов заметно влияют на климат!

И все же парниковый эффект (а вернее, его усиление) — основной фактор, поэтому расскажем о нем подробнее. Еще в первой четверти XIX в. французский математик и физик Жозеф Фурье¹ рассчитал, что если бы Земля грелась исключительно солнечными лучами, она должна была бы быть существенно холоднее. Его соотечественник Клод Пуье² развил его идеи и создал первую теорию парникового эффекта, высказав предположение, что невидимое инфракрасное тепло Земли частично перехватывается водяным паром и углекислым газом. В середине XIX в. американская изобретательница Юнис Фут и английский физик Джон Тиндаль³ независимо друг от друга измерили и продемонстрировали эмиссию и поглощение инфракрасной радиации различными газами. Наконец, в 1896 г. шведский химик Сванте Аррениус⁴ впервые посчитал, насколько вырастет температура планеты при гипотетическом удвоении количества углекислого газа. И лишь в начале XX в. шведский метеоролог Нильс Экхольм⁵ предложил термин «парниковый эффект».

¹ Барон (1809) Жан-Батист Жозеф Фурье (*фр.* Jean-Baptiste Joseph Fourier; 1768–1830) — французский математик и физик, известный работами по теории распространения тепла в твердом теле. Ряды и интегралы Фурье быстро стали инструментом математического исследования самых разных задач — в астрономии, акустике, теории приливов, радиотехнике и др.

² Клод Серве Матиас Пуье (*фр.* Claude Servais Mathias Pouillet; 1790–1868) — французский физик, которому принадлежит ряд изобретений в экспериментальной физике: прибор для исследования уклонений газов от действия закона Бойля — Мариотта при громадных давлениях, призма для интерференции света. С помощью особого прибора — пиргелиометра, необходимого для измерений прямой солнечной радиации, падающей на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам, — Пуье определил количество тепла, получаемого от Солнца поверхностью Земли.

³ Юнис Ньютон Фут (*англ.* Eunice Newton Foote; 1819–1888) — американская ученая и изобретательница. В ходе домашних научных экспериментов ею была открыта связь между размером доли углекислого газа в воздухе и скоростью изменения температуры воздуха. Именно эта связь затем была названа парниковым эффектом. Позже, в 1859 г. британским физиком Джоном Тиндалем (*англ.* John Tyndall; 1820–1893) (известным своими работами по магнетизму, акустике, поглощению теплового излучения газами и парами, рассеянию света в мутных средах) в журнале Лондонского королевского общества была опубликована статья об экспериментах, по результатам которых он пришел к аналогичным с Ю. Фут выводам.

⁴ Сванте Август Аррениус (*швед.* Svante August Arrhenius; 1859–1927) — шведский физикохимик, автор теории электролитической диссоциации, лауреат Нобелевской премии по химии (1903). В 1896 г. Аррениус впервые применил методы физической химии для оценки масштаба влияния роста концентрации углекислого газа в атмосфере на поверхностную температуру Земли за счет парникового эффекта. На основе его расчетов построена современная климатология.

⁵ Нильс Густав Экхольм (*швед.* Nils Gustaf Ekholm; 1848–1923) — шведский метеоролог, известный как руководитель шведской геофизической экспедиции на Шпицберген в 1882–1883 гг. Считается основателем шведской системы штормового

Суть этого эффекта в том, что некоторые газы (их список довольно велик, а на первом месте находится водяной пар) способны улавливать длинноволновое излучение Земли, нагревать атмосферу, которая сама начинает излучать тепло и дополнительно обогревать поверхность планеты. Этот дополнительный обогрев чрезвычайно важен для Земли, без него ее средняя температура была бы ниже на 33 °С и составляла бы -18 °С. Антропогенное усиление парникового эффекта создает тепловой дисбаланс, который очень мал (менее 1 Вт/м² или менее 1 % от теплового баланса поверхности), но именно он отвечает за усиление нагрева планеты, причем более 90 % этого тепла поглощается океаном и лишь 1 % идет на нагрев атмосферы.

То, что человек в результате своей деятельности влияет на климат, было ясно уже в начале XX в., о чем свидетельствует эпитафия к введению. В 1960-х гг. о текущем и будущем воздействии человека на климат стали говорить гораздо более активно, во многом благодаря трудам российского климатолога Михаила Ивановича Будыко⁶. В работе «Влияние человека на климат» (1972) М. И. Будыко писал, что «изменение температуры в результате роста концентрации углекислоты к 2000 г. может превысить аномалии естественных колебаний глобальной температуры, наблюдавшиеся в течение первой половины XX в. Можно думать, что продолжение роста концентрации углекислоты в XXI в. приведет к еще более значительным изменениям климата».

Тогда же, на рубеже 1960-х и 1970-х гг., началось бурное развитие палеогеографии (науки о том, как выглядела наша планета в прошлом) и ее раздела — палеоклиматологии. Первые данные о содержании углекислого газа в атмосфере по данным ледяных кернов Антарктиды показали, что концентрация CO₂ во второй половине XX в. существенно выше, чем когда бы то ни было за последние 150 тыс. лет. Данные палеоклиматологии во многом помогли понять, как действовала климатическая система планеты без влияния человека и, таким образом, отделить природные климатические факторы от антропогенных. Другая задача палеоклиматологии — поиск аналогов современного потепления в прошлом, что поможет спрогнозировать климат нашей планеты в грядущих столетиях.

предупреждения, которую он инициировал во время работы в Метеорологическом институте. Был одним из первых и энергичных представителей антропогенного контроля климата, указывая, что при нынешних темпах сжигания угля в конечном итоге можно удвоить концентрацию атмосферного CO₂. Придумал термин «теплица» для описания действия углекислого газа.

6

Михаил Иванович Будыко (1920–2001) — советский ученый, геофизик, климатолог, академик РАН (1992), почетный член Русского географического общества и Американского метеорологического общества, директор Главной геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова (1954–1972). Один из самых известных советских климатологов прошлого века.

Растущая тревога в связи с текущим и будущим влиянием человечества на климат заставила ООН и Всемирную метеорологическую организацию создать Межправительственную группу экспертов по изменению климата (МГЭИК) (англ. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), первый доклад которой вышел в 1990 г. В 4-м докладе МГЭИК (2007 г.) впервые было убедительно показано, что глобальное потепление за предыдущие 50 лет с вероятностью более 90 % обусловлено антропогенной деятельностью. В последующих докладах степень уверенности в этом выводе лишь выросла, и в них, более того, удалось количественно определить влияние различных природных и антропогенных факторов в наблюдающихся климатических изменениях. В частности, Земля со второй половины XIX в. по второе десятилетие XXI в. потеплела на $+1.1 \pm 0.2$ °C, из них вклад антропогенного роста парниковых газов составил $+1.5 \pm 0.5$ °C, а вклад других антропогенных факторов (в основном — аэрозолей) — -0.4 °C. Роль же природных факторов (солнечной и вулканической активности, а также собственной климатической изменчивости) относительно невелика: 0 ± 0.2 °C⁷.

Семинар Европейского университета по климатическим изменениям «Что лирики должны знать о физике, химии и других аспектах этих перемен»

Эта книга была составлена по следам серии публичных презентаций в рамках Климатического семинара Европейского университета, который проводился Центром исследований науки и технологий (Центром STS) в Санкт-Петербурге в 2020–2021 гг.⁸ У семинара было две главные задачи. Первая — познакомить социальных ученых с тем, что происходит с изменениями в климате с точки зрения разных естественных наук. Обычно те, кто принимает политические решения, сталкиваются с ситуацией, когда им доступны данные и мнения ученых из одной области, но отсутствует комплексная оценка происходящего, т. к. каждая отрасль естествознания опирается на свои методы и свои эмпирические данные. Социальные науки тоже оказываются в подобном

7

Более детально об этом можно прочитать в отчетах МГЭИК (<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>), а также в отчетах Росгидромета об изменении климата на территории России (<http://cc.voikovmgo.ru/ru/publikatsii/doklady/14-dokumenty/1992-tretij-otsenochnyj-doklad-rosgidrometa-ob-izmeneniyakh-klimata-i-ikh-posledstviyakh-na-territorii-rossijskoj-federatsii-2022-g>).

8

Семинар был организован и проводился при участии исследователей ЕУСПб — Олега Хархордина (профессор факультета политических наук, руководитель исследовательского центра Res Publica), Ольги Бычковой (доцент факультета социологии, руководитель Центра STS), Дмитрия Жихаревича (научный сотрудник Центра STS) и Сергея Астахова (научный сотрудник Центра STS и Центра Res Publica).

положении: им трудно говорить о социальных процессах, не замечая слона в комнате (проблему потепления), но когда они начинают слушать ученых из отдельных областей естественных наук, то оказывается, что каждая из них описывает только какую-то свою часть этого слона. Идея семинара — дать возможность составить целостное восприятие проблематики изменений климата. Вторая задача — создать обсуждение между представителями естественных и социально-гуманитарных наук, чтобы в последующем вместе ответить на вопрос, какие социально-политические и экономические меры адаптации к происходящим климатическим изменениям соответствуют задачам развития нашей страны и планеты в целом.

В семинаре приняли участие десять ученых-климатологов, для выбора которых использовались формальные наукометрические показатели, экспертные и неформальные оценки⁹. Поскольку сама процедура отбора экспертов-спикеров была нестандартной — «физиков» отбирали «лирики» (социальные исследователи), остановимся на ней подробнее.

Первый этап: осень-зима 2019 года

В Европейский университет обратился один из полисимейкеров с предложением подготовить список из десяти ведущих российских ученых, специализирующихся в изучении планеты и происходящих с ней процессов, которые могли бы принять участие в возможной экспертной работе по вопросам изменения климата. Для выполнения поставленной задачи были собраны две группы данных. В первом наборе были данные по научно-исследовательским и прикладным проектам, финансируемым различными российскими структурами и фондами с 2014 по 2019 г. Второй набор данных состоял из наукометрических баз данных, включающих информацию о публикационной активности российских ученых-климатологов¹⁰. На основе этих наборов был составлен предварительный список экспертов.

⁹ Организаторы признательны всем ведущим ученым-климатологам, которые приняли участие в нашем Климатическом семинаре 2020–2021 гг. и согласились инвестировать свое время и усилия для развития продуктивного взаимодействия между «лириками» и «физиками». Отдельная благодарность нашим коллегам из Центра институционального анализа науки и образования (ЦИАНО) ЕУСПб и Центра научной коммуникации Университета ИТМО за предоставление данных для наукометрического анализа публикаций российских климатологов.

¹⁰ База данных наиболее цитируемых в Scopus публикаций по климату, авторами которых были ученые с российской аффилиацией; база данных ученых-климатологов, публиковавшихся в российских научных изданиях и имевших самый высокий h-индекс в РИНЦ; наукометрический анализ, в том числе анализ базы данных получателей грантов от российских структур и научных фондов (всего в базе было 500 человек); наукометрический анализ научных публикаций по изменению климата тех ученых, которые указывали российские академические институции в качестве первой или второй аффилиации.

Кроме того, использовались неформальные оценки экспертов в области климатологии, в том числе журналистов, освещающих климатические изменения, научных коммуникаторов и ученых, работающих в смежных областях. Эти эксперты предложили свой список возможных участников и указали на тех ведущих ученых, которые по каким-то причинам не попали в наукометрические списки.

Между неформальным и наукометрическим списком оказалось много совпадений: шесть имен ученых-климатологов из десяти попали в обе группы. К концу 2019 г. был завершен процесс отбора на основе дополнительных показателей: 1) h-индекс цитирования в РИНЦ; 2) цитируемость статей, опубликованных в Scopus; 3) значимые научные гранты; 4) наукометрическая оценка.

Второй этап: осень 2020 года

В начале осени 2020 г. началась подготовка к публичному семинару и отбору спикеров. К предшествующим критериям были добавлены три дополнительных.

Во-первых, от спикеров ожидался определенный опыт научной коммуникации в публичном пространстве (например, участие в публичных лекциях или сотрудничество с научными журналистами). Во-вторых, учитывая образовательные и исследовательские цели Климатического семинара, решено было максимизировать разнообразие научных дисциплин и представить на семинаре голоса как можно большего количества «природных объектов» (экосистем) — океанов, рек, почв, атмосферы и вечной мерзлоты. В-третьих, стремясь сбалансировать представительство разных групп внутри российской климатологии, мы решили обратить особое внимание на долю женщин-ученых. Дисбаланс по этому критерию, особенно на уровне докторов наук, — до сих пор значимая проблема для большинства российских академических институтов. Как показывают статистические данные, в 2021 г. среди 346 497 исследователей всех специальностей, занимающихся фундаментальными и прикладными исследованиями в России, 24 074 (7,1 %) были докторами наук, из них 71,7 % (17 250) — мужчин и 28,3 % (6824) — женщин (Индикаторы науки, 2023: 42, 50).

На первом этапе отбора спикеров для Климатического семинара уже были определены шесть ученых — пять мужчин и одна женщина, специализирующиеся на океанологии, атмосферных науках, палеоклиматологии, исследовании вечной мерзлоты и гидрологии рек. При выборе оставшихся четырех участников использовались новые критерии отбора. Были выбраны три женщины и один мужчина, специализирующиеся в области ландшафтной экологии и исследования болот, почвоведения, экологического мониторинга и лесоведения. На этом этапе мы опирались на результаты предыдущего отбора и неформальные рекомендации, дополнительно ориентируясь на показатель представленности разных групп.

В итоге была определена группа из десяти ученых-климатологов, представляющих десять различных областей исследований. Большинство из них — сотрудники различных институтов РАН. Эти ученые имеют одни из самых высоких показателей цитируемости в рамках своих дисциплин и/или были рекомендованы экспертами. Все докладчики — доктора наук. Шестеро из них возглавляют институты, четверо руководят специализированными исследовательскими лабораториями. Шестеро являются членами-корреспондентами РАН. Отчасти по этим причинам наша выборка оказалась смещенной в сторону двух крупнейших городов страны и неуниверситетской науки: большинство ученых были из Москвы и Санкт-Петербурга и представляли исследовательский сектор, а не университеты.

При определении «родных» дисциплин участников семинара учитывались те отрасли науки, по которым была получена первая ученая степень — кандидата наук. Во всех случаях наши докладчики идентифицировали себя с этими дисциплинами, даже если их вторая ученая степень, доктора наук, была получена по другой. Например, физическая география классифицировалась нами как география, даже если по существу это физика. За одним исключением (собственно, география) участники семинара были распределены по двум большим группам: физика и биология. Несмотря на довольно четкое разделение, их внутридисциплинарные специализации охватывают обширную часть современных исследований в области климатических наук.

О чем эта книга?

Получившаяся книга предлагает уникальный взгляд на проблему изменения климата с точки зрения российских ученых и в российской перспективе. Она объединяет под своей обложкой главы, написанные ведущими российскими специалистами в области климатологии, океанологии, изучения углеродного цикла и основных природных объектов, формирующих этот цикл: океанов, почв, лесов¹¹, болот, вечной мерзлоты. Сегодня российские ученые в этих областях пользуются международным авторитетом и играют важную роль в работе МГЭИК. Подобный успех вполне закономерен. За последние 100 лет в нашей стране успела сформироваться целая научная традиция, внесшая заметный вклад в мировую климатологию и науки о Земле в целом: от образования геохронологии как специальной дисциплины о вечной

11 К сожалению, глава «Роль лесов и лесного хозяйства в смягчении последствий изменения климата», написанная в 2021 г. доктором биологических наук Натальей Лукиной, перед сдачей в печать из книги была исключена, так как, по мнению автора, представленные в ней данные и информация к моменту публикации устарели и могли бы ввести читателя в заблуждение. — *Примеч. изд.*

мерзлоте и создания первых геоинженерных проектов до предсказания М. И. Будыко современного глобального потепления.

Иными словами, российской науке есть чем гордиться. Тем не менее на сегодняшний день существует довольно мало работ, способных претендовать на роль популярного и полного введения в российскую климатологию. Эта книга по возможности восполняет этот пробел.

Она также уникальна своей региональной спецификой. Каждый из авторов в том или ином виде задается вопросом: что значит изменение климата для самой большой страны на планете? Стремясь дать на него ответ, они один за другим показывают, какие проблемы, связанные с глобальным потеплением, актуальны для нашей страны, что о них думает общественность и, наконец, что мы можем сделать, чтобы снизить их отрицательный эффект и адаптироваться к новой климатической реальности. Действительно, территория России — отличный пример для иллюстрации всего разнообразия последствий глобальных климатических изменений. Обладая самой большой в мире площадью вечной мерзлоты и торфяников, второй по величине долей возобновляемых водных ресурсов и примерно пятой частью всех мировых лесов, Россия, безусловно, является одной из ведущих «климатических держав», оказывающей определяющее влияние на планетарный углеродный цикл. Без сомнения, ее обширные природные богатства не потеряют своей значимости и при переходе мировой экономики на «низкоуглеродные рельсы», когда леса заменят нефтяные месторождения в качестве потенциального источника рентного дохода. Роль водно-болотных угодий, торфяников и почв в качестве экономических активов неоднозначна, однако, будучи мощнейшими поглотителями углерода, они смогут позволить нашей стране занять главную позицию в регулировании общемировых климатических проблем.

Вместе с тем Россия не только играет ведущую роль в формировании планетарного климата, но и является одной из стран, в наибольшей степени страдающих от его изменения.

- Более 60 % ее территории покрыто вечной мерзлотой, таяние которой несет опасность стоящей на ней промышленной и гражданской инфраструктуре.
- Год от года в стране растут риски катастрофических наводнений и лесных пожаров.
- Арктическое усиление постепенно превращается в новую угрозу национальной безопасности.

Климатические изменения стали для России источником одновременно как возможностей, так и угроз. Умело воспользоваться первыми и без больших потерь избежать вторых наша страна сможет только с помощью климатических наук. Изменения климата — глобальны, но за редкими исключениями их последствия локальны и специфичны. Именно комбинация этих двух аспектов делает книгу уникальной.

Ее можно разделить на 3 части:

1. Первые 3 главы посвящены физическим процессам в атмосфере (глава 1) и океане (глава 2), а также климату голоцена (глава 3).
2. Главы с 4-й по 7-ю посвящены описанию процессов в различных природных экосистемах, их реакции на изменения климата и их влиянию на углеродный цикл: рекам и вопросу водной безопасности (глава 4), вечной мерзлоте (глава 5), болотам (глава 6) и глобальным изменениям землепользования (глава 7).
3. Наконец, в последних двух главах речь идет о климатическом мониторинге (глава 8) и адаптации к изменениям климата (глава 9).

Каждая глава книги предлагает особый взгляд на изменение климата с позиции одной из основных естественных наук, занимающихся изучением Земли. При этом разделы книги не только служат вводными пособиями по различным климатическим дисциплинам, но и содержат справочную информацию о вкладе российских ученых в развитие соответствующих областей наук, а также рассказывают о месте России на глобальной «карте» климатических изменений. Мы постарались сделать книгу доступной по смыслу, понятной неспециалистам. Авторы стремились либо избегать специфической научной терминологии, либо раскрывать ее в тексте.

Тем не менее сквозь всю книгу проходит ряд понятий и терминов, которые имеет смысл пояснить здесь.

Концентрации парниковых газов в атмосфере измеряются в объемных долях, ppm (parts per million — частях на миллион, 100 ppm = 0,01 %). Для примера, за последние полмиллиона лет концентрация CO₂ менялась от 180 ppm (0,018 %) в ледниковые периоды до 280 ppm (0,028 %) в межледниковья, сейчас же она составляет 420 ppm (0,042 %).

Потоки вещества между резервуарами в ходе углеродного цикла (например, между атмосферой, с одной стороны, и океаном и растительностью — с другой) измеряют в Гт — гигатоннах (миллиардах тонн), иногда в петаграммах (Пг) (10¹⁵ грамм = 1 Пг = 1 Гт). Важно обращать внимание, идет речь о потоке углерода или о потоке, например, углекислого газа: 1 Гт С эквивалентна 2,67 Гт CO₂.

Человечество эмитирует много парниковых газов (углекислый газ, метан, закись азота, озон, фреоны и т. д.), у каждого из которых свой **потенциал глобального потепления** (ПГП). Например, метан обладает примерно в 80 раз более сильным парниковым эффектом, чем углекислый газ, поэтому говорят, что его ПГП равен 80. Чтобы одной величиной выразить антропогенную эмиссию парниковых газов, вводят понятие «эквивалент CO₂» (сколько тонн CO₂ нужно, чтобы создать такой же парниковый эффект, который создает 1 тонна этого газа), при этом каждый газ учитывается в соответствии с его ПГП. Скажем, 1 Гт метана = 80 Гт CO₂-экв.

Прогнозы изменения климата в будущем (в XXI в. и дальше) базируются на **социоэкономических сценариях развития человеческой цивилизации**, так называемых репрезентативных траекториях концентраций (Representative Concentration Pathways, RCP) и связанных с ними общих социально-экономических путей (Shared Socioeconomic Pathways, SSP). Каждый из этих сценариев предполагает определенные траектории развития демографической ситуации, экономического роста, технологий. Результат этих сценариев — прогнозы антропогенных эмиссий парниковых газов, которые затем передаются климатологам для построения климатического прогноза.

В литературе встречается несколько подобных сценариев, из которых можно выделить два крайних:

- сценарий SSP 1.9¹² примерно соответствует целям Парижского соглашения, т. е. ограничению глобального повышения температуры величиной 1.5–2 °С, для чего глобальные эмиссии CO₂ должны быть сведены к нулю примерно в середине XXI в.;
- сценарий SSP 8.5 — наихудший, при нем выбросы CO₂ утраиваются к 2075 году, а средняя температура вырастает к концу века на 3.3–5.7 °С.

Краткое содержание книги

Первая глава, написанная российским климатологом, специалистом в области диагностики и моделирования климатических изменений Владимиром Семеновым, посвящена истории формирования атмосферы Земли и эволюции планетарного климата. Автор дает ответы на фундаментальные вопросы климатологии: Что представляет собой климат? Как он возник? Как протекают его изменения? Почему они важны для человека?

Автор показывает, что климат современного четвертичного периода определяется не только детерминированными факторами, имеющими прямую причинно-следственную связь с вариациями радиационного форсинга и циклами Миланковича. Важную роль играют также «случайные» показатели, обусловленные стохастической динамикой атмосферы и океана.

После краткого введения в фундаментальную климатологию автор ставит цель объяснить сложность и неоднозначность процесса климатических изменений. Делает он это на примере трех заметных погодно-климатических аномалий последних лет:

12

Число соответствует итоговому радиационному антропогенному форсингу в Вт/м² к концу XXI в.; проще говоря, чем выше это число — тем сильнее будет повышение температуры.

- чрезвычайно холодные зимы в российских городах в начале 2000-х гг.;
- экстремальная жара лета 2010 г.;
- катастрофическое наводнение в Крымске в 2012 г.

Опираясь на исследования, В. Семенов дает всем трем событиям физическое обоснование:

- аномально холодная погода на территории России напрямую связана со степенью ледовитости Баренцева моря в зимний период;
- достижению рекордных температур в 2010 г. способствовала отрицательная аномалия влажности почвы в Поволжье и Южном Предуралье;
- экстремальные осадки в Крымске напрямую связаны с постепенным повышением температуры поверхности Черного моря в последние 30 лет.

Каждый пример иллюстрирует сложность и запутанность земной системы. Любое вмешательство в и без того хрупко сбалансированные планетарные процессы неизбежно запустит цепную реакцию, последствия которой могут оказаться катастрофическими.

Осознание человеком своей способности влиять на естественный ход событий путем повышения концентрации парниковых газов в атмосфере, увеличения радиационного фона или нерационального использования природных ресурсов ставит вопрос об ответственности людей за свои действия по отношению к Земле. Глава завершается размышлениями о возможном влиянии изменения климата на формирование новой общечеловеческой морали. Современные условия требуют от нас отказаться от бесконечной разрушительной погони за экономическим ростом и найти иные пути развития человечества, основанные на бережном отношении к окружающей среде и климату планеты.

Во второй главе речь идет о роли океана в формировании климата Земли. Исходной точкой рассуждений Сергея Гулёва, российского физика, климатолога, специалиста в области взаимодействия океана и атмосферы, морской метеорологии и динамики климата, является указание на консервативный характер Мирового океана. Для изменения термического состояния океану требуется примерно в 3400 раз больше времени, чем атмосфере. Именно это определяет ключевую роль океана в формировании глобального климата. Благодаря такому свойству океанские воды могут «запоминать» изменения основных климатических параметров на гораздо более длительный период по сравнению с атмосферой, обладающей крайне короткой «памятью». Это различие в скорости изменений и определяет специфику взаимодействия двух физических систем.

Основной фактор, позволяющий океану влиять на изменчивость температуры в атмосфере и климата в целом, — глобальная

межокеанская циркуляция или, иначе говоря, «межокеанский конвейер». Внимание на такую циркуляцию впервые обратил советский океанолог Сергей Сергеевич Лаппо. Ее принцип заключается в непрерывном обмене водными массами между Атлантическим и Тихим океаном: в поверхностном слое происходит перенос тепла течениями из Тихого океана в Атлантический, а в глубинном слое — наоборот. Полный цикл такого водообмена проходит как минимум за 300–500 лет. Тем не менее существуют и другие, более короткие режимы океанической изменчивости, такие как Эль-Ниньо (от 4 до 7 лет) или Тихоокеанская декадная осцилляция (десятилетия).

После обширного обзора влияния океана на климат Земли в главе рассматривается и обратный процесс: воздействие изменения климата на Мировой океан. Из-за медленного накопления тепла океан продолжает нагреваться даже тогда, когда тренды роста глобальной температуры замедляются или меняют знак на отрицательный. В итоге именно океан является глобальным аккумулятором избыточного тепла, образующегося в результате парникового эффекта. Более 90 % этого лишнего тепла усваивается океаном и лишь 1–2 % атмосферой. Этот феномен позволяет автору заключить: «Глобальное потепление — это потепление океана».

В заключении акцентируется место океана в глобальных потоках парниковых газов. В среднем океан является поглотителем CO_2 , однако с глобальным потеплением его роль может меняться. Так, поглотительной способностью обладают лишь относительно холодные и биологически богатые воды в средних и субполярных широтах, в то время как теплые воды являются эмитентами CO_2 . Автор отмечает, что антропогенное воздействие на климат таит угрозу запуска цепной реакции, в результате которой эмиссия парниковых газов будет только расти.

Третья глава, написанная Ольгой Соломиной, российским гляциологом и палеоклиматологом, специалистом в области количественных реконструкций климата высокого разрешения, посвящена эволюции климата Земли в голоцене — геологической эпохе продолжительностью примерно 11,7 тыс. лет, которая началась после последнего ледникового периода и продолжается по сей день. Понимание изменений климата в недавнем геологическом прошлом чрезвычайно важно, поскольку климат голоцена наиболее близок к современному. Выявление механизмов его изменчивости позволит адекватно оценить текущее состояние климатической системы и спрогнозировать ее будущее.

Исследования палеоклимата голоцена дают ответы на ряд практических вопросов:

- Как разделить естественную и антропогенную составляющие современных климатических изменений?
- Какие факторы влияли на климат голоцена и продолжают ли они действовать в наши дни?

- Когда закончится современное межледниковье и наступит новый ледниковый период?

Для ответов на эти вопросы используются специальные палеоклиматические реконструкции на основе анализа «природных архивов»: ледяных кернов, годичных колец деревьев, кораллов, сталагмитов. Ряды гидрометеорологических наблюдений коротки и редко охватывают больше одного столетия, поэтому климатологи обращаются к косвенным данным и более сложным методам их анализа.

Рассмотрев методы палеоклиматических реконструкций, О. Соломина описывает современные представления о колебаниях климата голоцена и их причинах. Она выделяет четыре основных фактора, влияющих на климат в текущей геологической эпохе:

- параметры земной орбиты и положение Земли по отношению к Солнцу;
- колебания солнечной активности;
- мощные вулканические извержения;
- параметры земной поверхности и состав атмосферы.

Глава завершается обсуждением влияния на климат голоцена солнечной активности и антропогенного фактора. Автор высказывает дискуссионную мысль: согласно данным моделирования, без антропогенного воздействия сейчас на Земле начался бы уже новый ледниковый период.

В четвертой главе Александр Гельфан, российский ученый-гидролог, специалист по моделированию формирования речного стока и гидрологических процессов, переносит акцент с изучения причин и механизмов изменения климата на его последствия для поверхностных и подземных вод планеты, затрагивая вопросы водной безопасности. Это концепция, признанная мировым сообществом в качестве одного из императивов глобального развития. Угроза водной безопасности — один из ключевых факторов глобального риска. Выделяют две составляющих этой угрозы:

- природная (связанная с естественными изменениями водных систем);
- неприродная (экономические, социальные, политические и институциональные последствия природной составляющей).

Происходящее на наших глазах антропогенное изменение климата меняет естественный, природный фон водной безопасности, усугубляя различные угрозы. Они в итоге ведут к трем основным проблемам: недостаток воды (засуха), ее избыток (наводнения) и низкое качество пресной воды.

А. Гельфан подробно анализирует влияние антропогенных изменений климата на водные ресурсы Земли, обращая особое внимание на изменение повторяемости, величины и силы наводнений, а также объемов речных стоков. Большое внимание уделяется методологическим и эпистемологическим проблемам, связанным с использованием ансамблей гидрологических и климатических моделей.

Автор убеждает в необходимости более тщательного анализа последствий климатических изменений. Вопреки интуиции, глобальное потепление не обязательно сделает засушливые регионы более засушливыми, а влажные — более влажными. Последствия потепления — засухи и наводнения, плохое качество пресной воды и затрудненный доступ к ней — распределяются по регионам неравномерно и усугубляются другими факторами. Это требует комплексного подхода к оценке и предотвращению угроз водной безопасности в нашей стране и во всем мире.

Пятая глава, написанная Олегом Анисимовым, российским климатологом, изучающим последствия изменений климата на территории России (в том числе в Арктике), посвящена вечной мерзлоте, ее изменениям в условиях глобального потепления, а также связанным с этим геокриологическим, социально-экономическим и инфраструктурным рискам.

Согласно современным представлениям, многолетнемерзлые грунты занимают 9–12 % суши, а вся криолитозона, куда входят области прерывистого и островного распространения мерзлоты, — 23–25 %. Большая часть «мерзлой земли» находится в России, где она занимает более 60 % территории. Именно российские и советские ученые стали пионерами в ее изучении, основав геокриологию — научную дисциплину, посвященную исследованию и анализу криолитозоны.

В начале главы дается краткий экскурс в историю геокриологии, затем следует подробное изложение современных научных представлений о вечной мерзлоте. По словам О. Анисимова, наблюдения указывают на изменения состояния многолетнемерзлых грунтов, начавшиеся в результате глобального потепления. К подобным преобразованиям относятся:

- увеличение температуры грунтов;
- уменьшение их прочностных свойств;
- интенсификация ряда деструктивных геокриологических процессов, таких как термокарст (проседание грунта за счет таяния содержащегося в нем льда), солифлюкция (оползание склонов), неравномерные просадки почвы и др.

Эти процессы ведут к большому количеству разнообразных последствий, которые автор предлагает разделять на социально-экономические (связанные со снижением несущей способности мерзлоты и надежности инженерно-технических сооружений) и экологические (обусловленные выбросами парниковых газов при деградации мерзлоты).

В конце главы дается оценка влияния таяния вечной мерзлоты на глобальный углеродный цикл. Автор опровергает гипотезу «метановой катастрофы», способной резко усилить климатический кризис. Согласно этой гипотезе, оттаивание мерзлых болот Западной Сибири и субаквальной мерзлоты на шельфе морей Восточной Арктики приведет к выбросам метана, способным кардинальным образом ухудшить

ситуацию на планете. Опираясь на ряд исследований, О. Анисимов приходит к выводу, что опасения по поводу роста эмиссии метана в результате таяния вечной мерзлоты сильно преувеличены.

Шестая глава, написанная российским биологом, экспертом по водно-болотным угодьям Сергеем Кирпотиним и др., посвящена сравнительно малоизученной роли болот в регулировании глобального климата.

Авторы утверждают, что на фоне возросших из-за потепления рисков лесных пожаров леса могут превратиться из поглотителей углерода в его источники. В связи с этим возрастает значение болот как важного фактора смягчения климатических изменений для России и других стран с высокой степенью заболоченности.

Торфяные болота — ключевые поглотители атмосферного углерода: занимая 3 % суши, они аккумулируют около 30 % его наземных запасов. В глобальном масштабе торфяники и болота выполняют функцию гигантского охладителя, регулирующего климат планеты за счет чрезмерного влияния на глобальный цикл углерода. Крупнейшее в мире болото — Большое Васюганское — находится в Западной Сибири, на территории которой сосредоточено около 40 % нетронутых болотных экосистем планеты. Это позволяет считать нашу страну уникальным регулятором общемирового климата.

В главе также описывается история изучения болот в России и других странах, рассматриваются современные подходы, концепции и инфраструктура для исследований водно-болотных угодий. В частности, особое внимание авторами уделяется мегатрансекту (мегапрофилю) — крупномасштабному исследовательскому комплексу, созданному для изучения Большого Васюганского болота.

Авторы отмечают и потенциальные угрозы от торфяных болот. К ним относится, например, атмосферное блокирование. Оно выражается в экстраординарно продолжительном пребывании антициклона на определенной территории, который препятствует переносу влажных воздушных масс с Атлантики и приводит к сильной жаре, засухе и, как следствие, пожарам. Воспламенение торфяников чревато выбросом огромного количества «старого» почвенного углерода, способного сильно повлиять на существующий углеродный цикл.

В заключение авторы призывают включить водно-болотные угодья в расчеты квот по исполнению Парижского соглашения в знак признания их глобальной климаторегулирующей функции.

Седьмая глава, написанная Ириной Кургановой, российским биологом, экспертом по почвоведению, продолжает тему депонирования углерода и роли почвы в глобальном углеродном цикле.

Сегодня, когда изменение климата считается одной из самых насущных экологических проблем, важно понимать, что почвенное органическое вещество является долговременным резервуаром органического углерода в наземных экосистемах, обеспечивая

устойчивость климатической системы Земли. Исходя из этого, в первой части главы И. Курганова дает представление о глобальном цикле органического углерода, приводит оценки планетарного баланса углерода и его запасов в почвах России. Так, согласно автору, наземные экосистемы нашей страны обеспечивают не менее пятой части глобального стока CO_2 . Помимо лесов решающую роль в этом процессе играют зарастающие сельскохозяйственные угодья. Автор замечает, что масштабные изменения в системе землепользования сопровождаются значительными выбросами или поглощением парниковых газов, оказывая тем самым существенное влияние на глобальный цикл углерода на планете.

Во второй части главы рассматриваются два важных события в истории отечественного сельского хозяйства:

- разработка целинных и залежных земель в эпоху СССР;
- масштабное забрасывание сельскохозяйственных полей после 1991 г.

Экологический ущерб, обусловленный освоением новых земель в СССР, заключался не только в колоссальных потерях углерода из почв, но и в практически полном исчезновении степных ландшафтов, резком уменьшении биоразнообразия и усилении аридизации. Несмотря на то, что эти события происходили более 60 лет назад, углекислый газ, поступивший в газовую оболочку Земли, будет сохраняться в атмосфере еще многие тысячи лет.

В свою очередь сокращение сельскохозяйственных угодий в 1990-е гг. имело совершенно противоположный эффект. На значительных площадях бывших пахотных почв был восстановлен покров многолетней растительности. Согласно исследованиям последних лет, ежегодный прирост углерода в почвах России за счет подобного восстановления оценивается довольно значительной величиной от 0,47 до 1,29 т углерода га/год.

В заключение автор обращается к мировому опыту использования почвосберегающих технологий. Особое внимание уделяется инициативе «4 промилле», нацеленной на привлечение сельскохозяйственных организаций и фермеров к переходу на устойчивое почвосберегающее земледелие. Новые технологии уже успели показать свою эффективность, обеспечив значительное усиление стока CO_2 в ряде европейских стран.

Анна Романовская, российский климатолог, эксперт в области геоэкологии, поднимает в восьмой главе вопрос о необходимости создания в России полноценной системы комплексного анализа климатических изменений. Такая система климатического мониторинга позволила бы проводить эффективную политику по смягчению последствий глобального потепления и по адаптации к ним.

После краткого экскурса в историю идеи мониторинга в СССР глава знакомит с пятью основными видами климатического мониторинга.

1. Мониторинг изменения климата обеспечивается станциями наблюдательной сети Росгидромета, всего их более 3500. Этот вид мониторинга позволяет регулярно составлять отчеты об изменениях климата в России, которые публикуются Росгидрометом и Институтом глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля.
2. Мониторинг последствий климатических изменений фиксирует опасные метеорологические явления и позволяет рассчитать связанный с ними ежегодный экономический и неэкономический ущерб.
3. Мониторинг климатической деятельности помогает оценить объем эмиссий парниковых газов, производимых на национальном, региональном и локальном уровнях.
4. Национальный мониторинг выбросов и поглощения парниковых газов призван помочь в определении точного сальдо эмиссии климатически активных веществ на территории России.
5. Мониторинг короткоживущих климатически активных веществ — особенно важный вид климатического мониторинга. Дело в том, что период «жизни» короткоживущих газов не превышает 10–12 лет. В связи с этим меры по сокращению выбросов короткоживущих климатически активных веществ могут вызывать ощутимый эффект уже в первые годы их применения, в то время как на сокращение выбросов долгоживущих парниковых газов (таких, как CO_2) климатическая система реагирует лишь через несколько десятилетий. Таким образом, наряду с контролем выбросов CO_2 меры по сокращению эмиссии подобных веществ могли бы снизить антропогенное повышение глобальной температуры еще на 0.5°C к 2050 году.

Эта глава продолжает дискуссии предыдущих глав, посвященных воде, вечной мерзлоте, болотам и почвам. Климатический мониторинг позволяет сплести воедино влияние на климат глобальных физических процессов, отдельных экосистем и антропогенного фактора, показывая тем самым полную картину положения дел на территории России и определяя место нашей страны на карте глобальных климатических изменений.

Наша книга, как ни парадоксально, заканчивается увертюрой, подчеркивая открытость разговора об изменении климата и приглашая читателей к продолжению дискуссии. В девятой главе российский физик, климатолог, специалист по физико-математическому моделированию глобального и регионального климата и климатическим рискам Владимир Катцов размышляет о возможных путях адаптации к изменению климата с акцентом на российское общество.

Согласно теоретическим оценкам, с высокой долей вероятности и независимо от всех принимаемых сегодня усилий по смягчению антропогенного воздействия на климат в ближайшие десятилетия человечество «приговорено» к определенному развитию событий.

Это заставляет серьезно задуматься об адаптации к среднесрочным последствиям потепления.

Очертив положение России в глобальном контексте, В. Катцов дает развернутое определение адаптации к изменениям климата — как процесса приспособления к существующему или ожидаемому климату и его воздействиям, в том числе путем предотвращения и уменьшения возможных климатических рисков и угроз.

Автор указывает на ключевую роль адаптации среди других усилий по противодействию климатическим вызовам. Уже сейчас погодно-климатические факторы и опасные явления, обусловленные глобальным потеплением, учитываются при принятии решений в политике и экономике. Тем более важна количественная оценка рисков для оптимальных адаптационных решений.

Признавая, что подобные решения на каждом из уровней должны основываться на постоянном диалоге между представителями наук, гражданского общества и политического руководства, автор считает, что именно климатология — важнейшее средство адаптации к последствиям глобального потепления. Любые адаптационные меры в основе своей должны опираться на достоверную информацию о настоящем и будущем состоянии климатической системы. В свою очередь, гидрометеослужба обладает как минимум двумя инструментами, способными обеспечить адекватное понимание настоящей климатической ситуации:

- государственная наблюдательная сеть климатического мониторинга;
- большое количество физико-математических моделей.

В. Катцов заканчивает нашу книгу призывом к всестороннему междисциплинарному взаимодействию в общем деле адаптации к новой климатической реальности.

Послесловие к предисловию

Важное замечание, необходимое для понимания этой книги: все главы были написаны в 2021 г., и хотя некоторые из авторов добавили примечания, поясняющие новые реалии, все-таки в книге в общем не учитываются некоторые из последовавших событий. Мы надеемся, что это обстоятельство незначительно влияет на актуальность и ценность монографии.

Она дает комплексное представление о самых разных проявлениях современных климатических изменений, позволяет понять, насколько сложно разные компоненты природы и общества переплетены между собой. Безусловно, книга подталкивает и к размышлениям о морально-нравственном аспекте наших взаимоотношений как с природой, так и друг с другом. Приемлема ли краткосрочная выгода для экономики и общества, если ее результатом становится

деградация и гибель целых экосистем? Да, в отдельных регионах и для отдельных групп населения глобальное потепление может приносить выгоду. Но можно ли спокойно пользоваться этой выгодой, зная, что где-то в другом (не таком уж далеком) уголке планеты люди страдают от нехватки пресной воды и еды, от участившихся стихийных бедствий и от наступающего океана?

Вызов, связанный с адаптацией к происходящим изменениям и с борьбой с их причинами, может быть преодолен только общими усилиями всего человечества. Глобальное потепление учит нас тому, что пора перестать делить людей на своих и чужих. Преодоление климатического кризиса — словно выпускной экзамен для человечества по окончании школы, который завершит индустриальный период развития и позволит нам — возможно! — шагнуть на следующую ступень цивилизации, контуры которой только-только начинают намечаться.