

наука и жизнь

ISSN:1683-9528

2023

Современная циклическая космология.Революция в науке?

 Озеро Байкал — эльдорадо для учёных, особенно для биологов

• С. А. Тихоцкий, член-корреспондент РАН: Создание отечественного геофизического оборудования и программного обеспечения — задача номер один • Да будет свет! Тем или иным способом.



R HOMEPE:

Н. ГОРЬКАВЫЙ — Цикличность
Большого взрыва2
А. ПОНЯТОВ, канд. физмат. наук —
Революция или нет? 11
Рефераты (подготовил
Л. Ашкинази) 14
Девять значимых событий 2022 года
в биологии и медицине (материал
подготовил К. Стасевич) 16
О чём пишут научно-популярные
журналы мира 28
С. ТИХОЦКИЙ, члкорр. РАН —
Геофизика: новые задачи
и возможности (записала
Н. Лескова)
Бюро иностранной научно-технической
информации46
М. ТИМОФЕЕВ, докт. биол. наук —
Неизведанный Байкал (беседу ведёт
Н. Лескова) 50

Специфика экосистемы озера заключается в том, что в этой огромной толще воды есть две неравные зоны. Первая — так называемая фотическая зона, туда проникает свет, благодаря чему происходит цветение мельчайших водорослей и высших водных растений, образуется первое органическое вещество — так называемая первичная продукция. В этой зоне обитает множество организмов, питание которых завязано на эту первичную продукцию. Глубина её максимум 40—50 метров.

Если же мы пойдём глубже, то попадаем в зону сумрака и далее в зону полнейшей тьмы. Это вторая зона — афотическая, куда свет не проникает...

Вести из лабораторий

Плавник как оптическое окно (65). Позднее отцовство может влиять на здоровье детей (66).

В.	ФЁДОРОВ, канд. геогр. наук — Солнце
	меняет климат 68
Λ.	. АШКИНАЗИ, Н. СЬЯНОВА —
	Что видим? Нечто странное!
	Защита от 80, 130

«УМА ПАЛАТА»

Познавательно-развивающий раздел для школьников

А. СДОБИНА — Прогулка вокруг марсианских вулканов (81). М. АБАЕВ, канд. хим. наук — Стекло под ногами, или Как дневной свет попал в подвал (89).

Наука и жизнь сто лет назад 95
В. МАКСИМОВ, канд. филол. наук —
Из истории фамилий96
Н. ЕСИПОВИЧ — В траве сидел
кузнечик певчий 100
И. СОКОЛЬСКИЙ, канд. фармацевт.
наук — Битый, дутый,
воздушный 107
Кунсткамера 110
А. ПЕРВУШИН — Наука о чужих.
Жизнь и разум во Вселенной.
І. Братья по разуму 112
Маленькие хитрости 126
Ответы на кроссворд
с фрагментами127
Кроссворд с фрагментами128
А. СТОЛЯРОВ — Продам конец света
(фантастическая повесть, начало) 132
Ю. ФРОЛОВ — Ходячие уличные
фонари

НА ОБЛОЖКЕ:

1-я стр. — Эндемики Байкала — рачки амфиподы *Parapallasea borowskii* в процессе спаривания. Жизнь продолжается! Фото Ксении Верещагиной, НИИ биологии Иркутского государственного университета. (См. статью на стр. 50.)

Внизу: Для оценки сейсмических рисков важны данные о палеоземлетрясениях, происходивших в глубокой древности. Такие данные получают в ходе полевых исследований геологических структур и затем на их основе проводят реконструкцию напряжений в земной коре. На фото — исследования в долине реки Чуя на Алтае. Фото предоставлено ИФЗ РАН. (См. статью на стр. 34.)



наука и жизнь

ЯНВАРЬ

2023

Журнал основан в 1890 году. Издание возобновлено в октябре 1934 года.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ЖУРНАЛ

СОЛНЦЕ МЕНЯЕТ КЛИМАТ

Кандидат географических наук Валерий ФЁДОРОВ, географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова.

Климат на Земле стремительно меняется. Связанные с этим природные явления создают риски для благополучия жизни будущих поколений. Особое беспокойство и тревогу вызывают сокращение площади морских льдов, горных и полярных ледников, деградация вечной мерзлоты, повышение уровня Мирового океана, изменение режима и интенсивности атмосферных осадков, увеличение числа тайфунов и ураганов, засушливых периодов и масштабных природных пожаров, рост неустойчивости в развитии природных процессов.

Достоверное прогнозирование последствий климатических изменений возможно, если оно базируется на реалистичных факторах, влияющих на климат. Среди таких факторов основными считаются солнечная радиация, парниковый эффект, вулканическая деятельность и механизмы теплообмена.

Вконце XIX века Сванте Аррениус высказал предположение, что глобальные изменения климата могут быть связаны с изменением содержания двуокиси углерода в атмосфере. В настоящее время мнение о том, что основная причина изменения глобального климата — парниковый эффект, связанный, главным образом, с эмиссией парниковых газов, которая определяется антропогенным фактором, - претендует на статус достоверного и общепризнанного. Однако убедительные научные доказательства, подтверждающие это мнение, не приводятся. В связи с этим попытаемся оценить влияние углекислого газа, связанного с деятельностью человека, на изменения термического режима атмосферы и разобраться в реальных причинах, определяющих эволюцию современного глобального климата.

ЛОЖКА РУКОТВОРНОГО УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В БОЧКЕ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Для начала напомним, что такое парниковый эффект Земли. Парниковый эффект проявляется в способности ряда газов и аэрозолей удерживать тепло, получаемое нашей планетой от Солнца. Иными словами, приходящая от Солнца коротковолновая радиация разогревает поверхность нашей планеты, которая излучает тепло в

виде длинноволнового (инфракрасного) излучения. Это тепло нагревает атмосферу и частично удерживается ей.

Оценка парникового эффекта основывается на понятии эффективной температуры Земли T_{a} и её отличии от фактической температуры земной поверхности. Эффективная температура T_{α} соответствует потоку инфракрасного излучения от Земли L, уходящему в космос, в расчёте на единицу земной поверхности. Она (в градусах Кельвина) оценивается в соответствии с законом Стефана-Больцмана ($L = \sigma T_{e}^{4}$). Если обозначить через T температуру земной поверхности, то разность $\Delta T = (T - T_e)$ есть парниковый эффект. Сотрудники Национального центра атмосферных исследований (США) показали¹, что интенсивность солнечной радиации на верхней границе атмосферы составляет 341,3 Вт/м². Если принять альбедо Земли, то есть долю приходящей солнечной радиации, отражённой атмосферой и земной поверхностью, равным

¹ Trenberth K. E., Fasullo J. T., and Kiehl J. Earth global energy budget. // American meteorological society, march 2009. P. 311—323.

² Общепринятое значение для Земли, рассчитанное на основе измерений отражённой радиации от поверхностей разного типа — водной, снежной и др., и атмосферы.

³ Смирнов Б. М. Физика глобальной атмосферы. —Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2017.

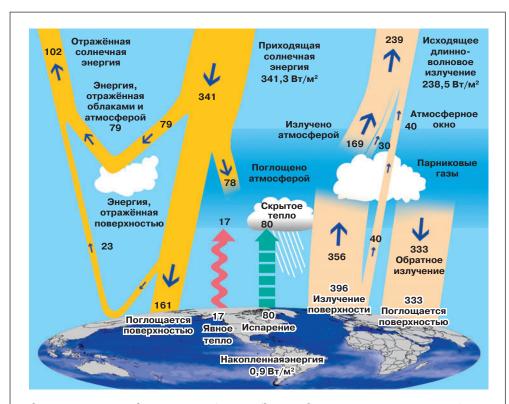
30%², то отражённая радиация составит 102,4 Вт/м². Достигающей поверхности Земли солнечной радиации (238,9 Вт/м²) в соответствии с формулой Стефана—Больцмана соответствует эффективная температура, равная 254,7 К. Таким образом, парниковый эффект оказывается равным 33,3 К.

В случае, если бы у нашей планеты не было атмосферы (при существующем притоке солнечной радиации), её температура была бы ниже нынешней приблизительно на 33°С и составила бы –18°С (255 К). Среднегодовая приповерхностная температура Земли 288 К. Следовательно, парниковым эффектом планеты определяется 11,4% (33 К) температурного режима Земли.

Оценим теперь способность человека влиять на глобальную температуру нашей

планеты. Основной парниковый газ — водяной пар. Это понятно, так как около 70% земной поверхности занято океаном, с поверхности которого вода испаряется. Содержание водяного пара в атмосфере в среднем составляет около 2% и может достигать 4% в единице объёма воздуха. Содержание углекислого газа (суммарно естественного и антропогенного) всего 0,04% (или 400 ppm — миллионных частей в единице объёма воздуха).

Водяной пар удерживает около 75—80% длинноволновой радиации. На долю CO₂ (суммарно естественного и антропогенного), по расчётам доктора физико-математических наук Бориса Михайловича Смирнова³, приходится около 15—20% (для безоблачного неба). Принимая, что водяным паром определяется 75% парникового эффекта, а CO₂— 20%, их



Составляющие радиационного баланса Земли. Стрелками схематично обозначены потоки энергии.

Рисунок (с изменениями) из статьи: Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J. Earth global energy budget. // American meteorological society, march 2009. P. 311—323.



Атмосферная станция у вершины вулкана Мауна-Лоа (Mauna Loa Observatory — MLO) на острове Гавайи, США. Здесь впервые в 1958 году начали инструментальные наблюдения за содержанием углекислого газа и долгое время вели их только здесь.

вклад в температурный режим атмосферы составит (от 33 K) 24,75 K и 6,6 K соответственно. Парниковый эффект, обусловленный углекислым газом, определяется естественной и антропогенной составляющей. Антропогенные выбросы в настоящее время, как показал ведущий сотрудник географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова Владимир Николаевич Голубев⁴, составляют приблизительно 9 Гт/год. Суммарное содержание СО₂ в атмосфере сегодня оценивается в 910 Гт.

Каково влияние этих выбросов на термический режим атмосферы и как он менялся в период интенсивного индустриального развития (1959—2021 годы)? Общее содержание $\mathrm{CO_2}$ в атмосфере в 1959 году⁵ составляло 316 ррт, в 2021 году — 414,7 ррт. Следовательно, за период с 1959 по 2021 год его содержание возросло на 98,7 ррт, увеличиваясь в среднем за год на 1,57 ррт. Поскольку 1 ррт приблизительно равен 0,5 Гт, то ежегодное увеличение углекислого газа в этот период составляло 0,78 Гт.

Примем для всего периода ежегодные антропогенные выбросы ${\rm CO_2}$, равные 9 Гт (хотя, по данным В. Н. Голубева, ещё в начале нынешнего тысячелетия они составляли около 7,5 Гт). Ежегодное поступление естественного ${\rm CO_2}$ с поверх-

ности материков и океана (без учёта вулканических выбросов), по данным Агентства по охране окружающей среды США, составляет около 211 Гт. Эти ежегодные поступления вовлекаются в углеродный цикл и поглощаются в области стока CO_2 — в Мировом океане.

При этом в среднем за год остаётся непоглощённым $0.78~\mathrm{FT}$ — таково ежегодное увеличение содержания $\mathrm{CO_2}$ в атмосфере. В данном остатке антропогенный углекислый газ составляет не более 4.1% (9 Гт/(9 Гт + 211 Гт) = 0.0409). Таким образом, ежегодно в атмосфере накапливается $0.032~\mathrm{FT}$ антропогенного $\mathrm{CO_2}$. Следовательно, за $62~\mathrm{годa}$ (с $1959~\mathrm{Im}$ по $2021~\mathrm{год}$) в атмосфере накопилось $2.01~\mathrm{FT}$ диоксида углерода, связанного с деятельностью человека. От общего содержания $\mathrm{CO_2}$ в атмосфере — $910~\mathrm{FT}$ — это составляет 0.22%.

Теперь оценим вклад антропогенного углекислого газа в изменение приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) за тот

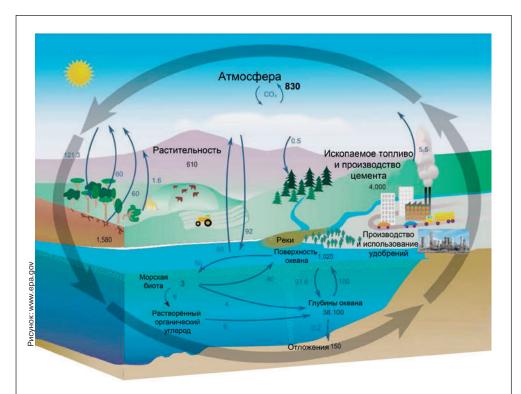
 $^{^4}$ Голубев В. Н. Роль арктического морского ледяного покрова в газообмене поверхностных геосфер. // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 4, с. 17—29.

^{5 1959} год — год начала инструментальных наблюдений за содержанием углекислого газа, которые вели долгое время только на станции Мауна-Лоа на Гавайских островах.

же период. Аномалия приповерхностной температуры воздуха в Северном полушарии, по данным университета Восточной Англии и метеобюро Хэдли (Hadley Center, Великобритания), в 1959 году оценивается в 0,073°C, в 2021 году — в 1,178°C6, то есть изменение приповерхностной температуры воздуха за этот период составляет 1,105°С. Допустим, что всё потепление связано только с парниковым эффектом (то есть примем, что поступление солнечной радиации не изменялось, вулканических извержений в этот период не происходило) и увеличение содержания водяного пара в атмосфере происходило сходным образом с увеличением СО₂. Тогда 75% роста приповерхностной температуры воздуха (0,829°C) связано с водяным паром, а 20% (0,221°C) определяется углекислым газом. Поскольку антропогенный ${\rm CO}_2$, накопленный за этот период, составляет 0,22% от его общего содержания, то из 0,221°С углекислым газом естественного происхождения в Северном полушарии определяется 0,2205°С, а антропогенным — 0,0005°С.

В Южном полушарии аномалия приповерхностной температуры воздуха в 1959 году оценивалась в $-0,038^{\circ}$ С, в 2021 году — в 0,481°С, то есть её увеличение составляет 0,519°С. В этом случае с водяным паром связано увеличение приповерхностной температуры воздуха на 0,389°С, с углекислым газом — на 0,104°С. Вклад антропогенного CO_2 в потепление в Южном полушарии с 1959 по 2021 год составляет всего 0,0002°С.

Для Земли аномалия приповерхностной температуры воздуха в 1959 году составляла 0,017°С, в 2021 — 0,827°С, то есть ПТВ Земли увеличилась за 62 года на 0,810°С. Вклад водяного пара в этот рост — 0,608°С, вклад суммарного углекислого газа — 0,162°С. При этом антро-



 Γ лобальный углеродный цикл. Чёрными цифрами обозначены запасы углекислого газа в гигатоннах, синими цифрами — потоки в год (Γ m/год).

⁶ За климатическую норму Всемирная метеорологическая организация принимает средние значения за 1961—1990 годы.



Вулканические извержения сопровождаются выбросами расплавленных магматических продуктов, пепла и газов, в том числе огромного количества двуокиси углерода. На фото трещинное Толбачинское извержение на востоке Камчатки, произошедшее в 1975—1976 годах.

Фото Анатолия Хренова (из книги: Фёдоров В. М., Залиханов А. М., Дегтярев К. С. Гравитационные факторы и астрономическая хронология вулканической и сейсмической активности Земли. — М.: «КДУ», «Добросвет», 2022).

погенный CO₂ ответственен за увеличение приповерхностной температуры воздуха Земли на 0,0004°C.

Эти значения находятся в пределах ошибок измерения температуры. Следовательно, наблюдаемое глобальное потепление не связано с деятельностью человека. Напомним, что при оценке вклада антропогенного CO₂ в температурный режим мы не учитывали вулканические извержения для периода с 1959 по 2021 год. Хотя их происходит в среднем около 20 каждый год, что приводит к увеличению общего

содержания ${\rm CO_2}$ в атмосфере и снижению доли антропогенного углекислого газа в её термическом режиме.

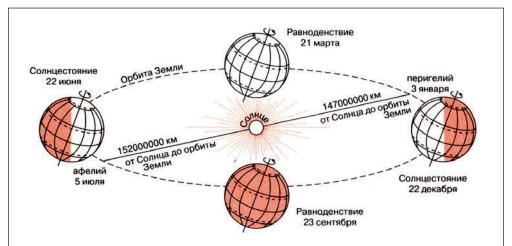
Полученные оценки подтверждаются и геологической историей Земли, на протяжении которой изменения содержания углекислого газа со значительным размахом происходили задолго до появления человека.

СОЛНЕЧНЫЕ ЛУЧИ И ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ

Солнечная радиация — основной источник энергии гидрометеорологических, биохимических и многих других процессов, происходящих в природной системе Земли и её компонентах — в атмосфере, гидросфере, биосфере, криосфере и в поверхностном слое литосферы. Кроме того, она — важнейший фактор развития жизни на Земле, обеспечивающий необходимые термические условия и поддерживающий процесс фотосинтеза. При отсутствии солнечного излучения температура на Земле была бы близка к температуре окружающего её пространства, то есть к абсолютному нулю (0 K) или -273°C. Как отмечалось выше, с парниковым эффектом планеты связано 11,4% теплового режима. Остальные 88,6% определяются солнечной радиацией, то есть 255 К (эффективная температура) от 288 К.

Традиционно различают внутригодовые (сезонные), межгодовые и многолетние изменения климата. Ещё во II веке до н. э. Гиппарх дал объяснение смене климатических сезонов года. Причина этой смены — изменение наклона падения солнечных лучей, связанное с орбитальным движением Земли и наклоном оси её вращения. (Неслучайно «климат» в переводе с греческого языка означает «наклон».) Именно поэтому полушария в течение года получают поочерёдно то больше (в это время в полушарии лето), то меньше (в это время в полушарии зима) солнечной энергии. То есть смена климатических сезонов определяется естественными причинами.

Межгодовые изменения климата — наиболее сложно объяснимое явление, потому что вызываются нерегулярными хаотическими движениями, связанными с коле-



Орбитальное движение Земли. Из-за наклона земной оси к плоскости орбиты при орбитальном движении Солнце освещает больше то Северное, то Южное полушарие планеты. Неравномерность освещения и нагрева земной поверхности вызывает смену сезонов года.

Рисунок из статьи: Фёдоров В. М. Эволюция современного глобального климата Земли и её возможные причины. // Геориск, 2020. Т. 14. № 4. С. 16—29.

баниями, как в отдельных компонентах природной системы, так и в природной системе в целом. В этих изменениях есть некоторые статистические закономерности, но всё же они нерегулярные.

На географическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова разработана солярная теория изменения климата⁷, согласно которой тенденции многолетних климатических изменений связаны с изменением угла наклона оси вращения Земли. Попробуем это обосновать.

Вариации приходящей к Земле солнечной радиации определяются двумя причинами, имеющими разную физическую природу. Одна связана с изменением активности Солнца: амплитуда колебаний в известном 11-летнем цикле солнечной активности составляет около 1 Вт/м² (солнечную активность мы учитывать не будем). Другая причина связана с небесномеханическими процессами, влияющими на характеристики орбитального движения (расстояние Земля — Солнце, эксцентриситет орбиты, соотношение линии афелий — перигелий с линией равноденствен-

ных точек), и углом наклона оси вращения Земли на характер её облучения.

Ранее автор статьи совместно с Андреем Анатольевичем Костиным (МГУ им. М. В. Ломоносова) рассчитали приходящую к Земле солнечную радиацию. В расчётах использовали показатели высокоточных астрономических эфемерид (массива данных, в которых содержатся

СЛОВАРИК

Афелий — точка земной орбиты, максимально удалённая от Солнца.

Перигелий — точка земной орбиты, минимально удалённая от Солнца.

Эксцентриситет орбиты — степень эллиптичности орбиты. Например, для окружности эксцентриситет равен нулю.

Солярный климат (радиационный климат) — поступление и распределение по поверхности земного шара солнечного излучение, которое рассчитывается теоретически. В расчётах учитываются лишь астрономические факторы, географическая широта и время года.

 $^{^7}$ Фёдоров В. М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. — М.: Физматлит, 2018.

орбитальные характеристики планет на каждые сутки) для всей поверхности Земли (без учёта атмосферы) в интервале от 3000 года до н. э. до 3000 года н. э. Изменение солнечной активности при этом не учитывалось. Согласно результатам этих расчётов, годовое поступление к Земле солнечной радиации за 6000 лет сократилось всего на 0,005%. Однако отмечается её увеличение в экваториальной области (на 0,25%) и сокращение в полярных районах (на 2,73%). То есть проявляется тенденция усиления широтной контрастности в солярном климате Земли.

Угол наклона Земли, с которым, как отмечалось, связана смена климатических сезонов, периодически изменяется. Период его колебания близок к 40 тыс. лет, а размах составляет около 2°37′ (это 11,1% от современного угла наклона 23,44°).

Известно, что при уменьшении угла наклона оси происходит увеличение приходящей солнечной радиации в экватори-

Изменение угла наклона 22,1° Угол наклона 3кв дтор

Изменение угла наклона оси вращения Земли. Амплитуда его изменения приблизительно 2°37′. Современный угол наклона составляет 23.44°.

Рисунок из статьи: Фёдоров В. М., Фролов Д. М. Изменение облучения Земли в фазу уменьшения наклона оси её вращения. // Геофизические процессы и биосфера, 2022. Т. 21. № 4. С. 74—84.

альной области и сокращение в полярных районах⁸. Таким образом, увеличивается меридиональный градиент инсоляции, которым регулируется интенсивность переноса радиационного тепла из экваториальной области в полярные районы.

Как же менялся годовой меридиональный градиент инсоляции по широтам последние 5000 лет? Проведённые расчёты показали, что максимумы его увеличения (годовые зоны неустойчивости) локализованы вблизи полярных кругов, то есть около 60-70° с. ш. Эти зоны неустойчивости совпадают с районами максимального развития внетропических циклонов в полушариях. Увеличение годового меридионального градиента также приходится на области локализации циркуляционных ячеек Хэдли и Ферреля (среднеширотная ячейка) в атмосфере, а его уменьшение отмечается в областях локализации полярных ячеек.

В зимнее и летнее полугодие для каждого полушария меридиональный градиент инсоляции по широтам меняется по-разному. Как удалось установить, в Северном полушарии в зимнее полугодие его значения максимально увеличиваются в широтной зоне 15-20° ю. ш. и максимально сокращаются в зоне 10—15° ю. ш.9. В летнее полугодие (для Северного полушария) максимальное увеличение отмечается в широтной зоне 10—15° с. ш., максимальное сокращение - в широтной зоне 5—10° с. ш. Таким образом, в летних полугодиях в полушариях выделяются сезонные зоны неустойчивости, расположенные в широтном диапазоне 5—20° широты.

Как можно заметить, сезонные зоны неустойчивости совпадают с областями генерации тропических циклонов — атмосферных вихрей огромного диаметра с пониженным давлением воздуха в центре,

 $^{^8}$ Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. — М.-Л.: ГОНТИ, 1939.

⁹ Изменение меридионального градиента инсоляции проявляется в полушариях, когда там лето. То есть когда в Северном полушарии зима — данное явление проявляется в Южном полушарии, где в это время лето. Когда же в Северном полушарии лето, то данное явление отмечается в его широтах.

О ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ЯЧЕЙКАХ АТМОСФЕРЫ

Основная движущая сила атмосферной циркуляции — это энергия Солнца, которая в среднем нагревает атмосферу больше у экватора и меньше у полюсов. Атмосферная циркуляция переносит энергию по направлению к полюсам, таким образом уменьшая градиент температур между экватором и полюсами. Механизм, при помощи которого это реализуется, различается в тропических и внетропических широтах.

Pисунок: Kaidor/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0

Ячейка Хэдли — один из элементов циркуляции земной атмосферы, на-

блюдаемый в тропических широтах. Он характеризуется восходящим движением у экватора, направленным к полюсу потоком на высоте 10—15 км, нисходящим движением в субтропиках и потоком по направлению к экватору и к полюсу у поверхности.

Впервые атмосферную циркуляцию в тропиках описал в 1735 году английский метеоролог Джордж Хэдли, по имени которого эти ячейки и получили своё название. Правда, Хэдли считал, что эти ячейки простираются в каждом полушарии от

экватора до самых полюсов. Американский школьный учитель и метеоролог Уильям Феррель в 1856 году уточнил схему Хэдли, показав, что в умеренных широтах (примерно 30 и 65° с. ш. и 30 и 65° ю. ш.) возникают ячейки вертикальной атмосферной циркуляции противоположного направления. Их назвали ячейками Ферреля.

Полярные ячейки — элементы циркуляции земной атмосферы в приполярных районах Земли, имеют вид приповерхностного вихря, который закручивается на запад, выходя из полюсов, и высотного вихря, закручивающегося к востоку.

80% которых формируется в пределах 10—20° широты в летних полушариях. С вихревым переносом энергии в основном и связана интенсивность меридионального переноса радиационного тепла из низких широт в высокие. В полярных областях (полярные циркуляционные ячейки) в зимние полугодия в полушариях отмечается увеличение сезонного меридионального градиента инсоляции, а в летние полугодия — его сокращение. Напомним, что перенос радиационного тепла в атмосфере осуществляется вихревыми образованиями (главным образом, циклонами) и циркуляционными процессами в ячейках общей циркуляции атмосферы.

Вихри (циклоны) переносят энергию в атмосфере из области источника тепла (из низких широт) в области его стока (в высокие широты). Известно, что мощность энергии, выделяемой в тропическом циклоне среднего размера, составляет около 10^{15} Вт (ПВт). Это значительно превосходит мощность всей потребляемой человечеством энергии за год (например, в 2008 году она составляла $15 \cdot 10^{12}$ Вт, или $15 \cdot 10^{12}$.

Ежегодно в Северном полушарии отмечается от 60 до 70 тропических циклонов, в Южном полушарии из-за большей однородности подстилающей поверхности — всего 5—10. С усилением отмеченных зон неустойчивости (турбулентности) связано наблюдаемое увеличение числа ураганов и тайфунов, внетропических циклонов (то есть вихревой активности), рост неустойчивости природных процессов и увеличение числа климатических катастроф.

Теперь посмотрим, как связаны многолетние изменения приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана Земли с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности.

Для полушарий инсоляционная контрастность рассчитывалась как разность

солнечной радиации, приходящей в широтные области 0—45° (источник тепла) и 45—90° (сток тепла) за год. Она, таким образом, обобщённо отражает изменения меридионального градиента инсоляции. При этом её многолетние изменения линейно связаны с изменением угла наклона оси вращения Земли. Эту закономерность определили с использованием корреляционного анализа — метода обработки статистических данных, с помощью которого измеряется теснота связи между двумя или более переменными. Этот же метод анализа показывает, что многолетние изменения (1900—2021 годы) приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана Земли и полушарий (которые в основном описываются трендами) характеризуются тесными положительными корреляционными связями с многолетними изменениями инсоляционной контрастности и отрицательными с многолетними изменениями угла наклона оси вращения Земли. Угол наклона оси вращения за 1900—2021 годы уменьшился на 0,015°. Инсоляционная контрастность за этот период увеличилась на 0,7 Bт/м², и значения приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана возросли приблизительно на 1,0 и 0,9°C соответственно.

Оказалось, что инсоляционной контрастностью определяется около 80% изменений приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана. Также изменениями инсоляционной контрастности объясняется более 90,0% многолетних изменений уровня Мирового океана, 76,0% изменения среднегодовой площади морских льдов в Северном полушарии, в среднем 95,9% многолетних изменений суммарного баланса массы льда в ледниковых районах Северного полушария¹¹.

Таким образом, эволюция современного глобального климата определяется естественными причинами. Основная из них — изменение наклона оси вращения Земли, регулирующего распределение приходящей к нашей планете солнечной радиации по широтам и сезонам, а также интенсивность меридионального переноса радиационного тепла.

 $^{^{10}}$ Фёдоров В. М. Эволюция современного глобального климата Земли и её возможные причины. // Геориск, 2020. Т. 14. № 4. С. 16—29.

¹¹ Фёдоров В. М. Тенденции и причины изменений климата Земли в современную эпоху: монография, электронное издание сетевого распространения. — М.: «КДУ», «Добросвет», 2018.

Тропический циклон «Чапала» в Аравийском море 30 октября 2015 года. Циклоны постоянно и естественным образом появляются из-за вращения Земли, благодаря силе Кориолиса и контрасту температур. Тропические циклоны образуются в тропических широтах и имеют меньшие размеры, чем внетропические (обычно порядка 100 км, редко — 1000 км), но большие градиенты давления и скорости ветра, доходящие до штормовых. Источник: NASA Goddard MODIS Rapid Response Team.



КАК ЖЕ РАСТЁТ ТЕМПЕРАТУРА И ЧТО НАС ЖДЁТ?

Физический механизм тесной связи многолетних изменений приповерхностной температуры воздуха и температуры поверхности океана, площади морских льдов и суммарного баланса массы горных ледников в ледниковых районах Северного полушария с инсоляционной контрастностью в обобщённом виде может сводиться к следующему. Увеличение инсоляционной контрастности, связанное с уменьшением угла наклона земной оси вращения, управляет интенсивностью меридионального переноса радиационного тепла и, следовательно, приводит к увеличению переноса энергии (циркуляционными процессами в атмосфере и, главным образом, вихревыми образованиями) из низких широт в высокие. Следует учесть, что площадь областей годового стока тепла в полушариях приблизительно в 2,7 раза меньше площади областей его источников (а летнего стока — в 4,53 раза меньше). В связи с этим радиационное тепло, переносимое из низких широт в высокие, распределяется по меньшей площади и его удельные характеристики возрастают. В результате меридионального переноса тепла температура (приповерхностная температура воздуха и температура поверхности океана) в областях его стока увеличивается (явное тепло). Это при-

водит к росту испарения, повышению содержания водяного пара в атмосфере, усилению парникового эффекта и появлению дополнительного тепла, которое становится причиной нового потепления, увеличения испарения и т. д. Эти процессы, многократно повторяясь, приводят к формированию механизма усиления потепления. Кроме того, в результате конденсации из-за адвекции (переноса) тёплых воздушных масс в высокие широты выделяется тепло, которое также вносит дополнительный вклад в процессы радиационного теплообмена в атмосфере. Также следует учитывать положительные обратные связи — уменьшение альбедо из-за сокращения площади морских льдов, горных ледников, уменьшения продолжительности залегания снежного покрова. Этим механизмом определяется повышение глобальной температуры и другие природные явления, связанные с изменениями температуры атмосферы, земной поверхности и океана.

Надо отметить, что из-за различий в полушариях (Северное полушарие более континентальное, Южное — более океаническое) эволюция климата в них несколько отличается. Во-первых, в Северном полушарии вихревых образований (тропических и внетропических циклонов) значительно больше, чем в Южном. Во-вторых, в Южном полушарии

меридиональный перенос радиационного тепла заметно блокируется зональной циркуляцией — «ревущими сороковыми» в атмосфере, то есть сильными и устойчивыми западными ветрами между 40-й и 50-й широтами, и циркумантарктическим течением в океане. Поэтому процессы потепления более заметно проявляются в Северном полушарии.

Из оценочного прогноза, выполненного на основе простых регрессионных моделей, следует, что до 2050 года приповерхностная температура воздуха в Северном полушарии увеличится на 1,1—1,2°С относительно климатической нормы 1961—1990 годов. В Южном полушарии она тоже вырастет, но на гораздо меньшую величину 0,6—0,7°С. Температура поверхности Мирового океана также увеличится приблизительно на 0,5—0,6°C. Максимальная площадь морских льдов в Северном полушарии (которая наблюдается в марте) сократится до 11 млн км², а минимальная (в сентябре) — до 6 млн км². Ожидается, что уровень Мирового океана в 2050 году будет на 3,5 см выше уровня 2008 года. Содержание углекислого газа в атмосфере к тому же году увеличится на 65,5 ppm (то есть на 16,3%) относительно 2015 года (год заключения Парижского соглашения по климату) и достигнет 466 ppm или 0,466%. Это увеличение содержания СО, произойдёт за счёт повышения температуры поверхности океана. Известно, что при повышении температуры поверхности океана растворимость углекислого газа в воде уменьшается и, как следствие, его содержание в атмосфере растёт. Таким образом, увеличение содержания ${\rm CO_2}$ в атмосфере — не причина, а следствие потепления климата. На это указывали геофизик, академик РАН Кирилл Яковлевич Кондратьев, геофизик и океанолог, академик РАН Андрей Сергеевич Монин и другие.

Кроме инсоляционной контрастности и геодинамического колебания температуры поверхности океана (известного в Северной Атлантике как AMO — Atlantic multidecadal oscillation) есть и другие радиационные факторы, способные изменять климат. Например, инсоляционная сезонность полушарий, то есть разность между летним и зимним облучением. Известно, что материки летом нагреваются сильнее, чем океан, и становятся источниками тепла. Зимой, наоборот, материки сильнее охлаждаются, и океан становится источником тепла. Инсоляционной сезонностью регулируется теплообмен в системе океан — материк. Следствие изменения интенсивности этого теплообмена — изменение сезонных температурных различий в полушарии.

Другой фактор — межполушарный теплообмен, который определяется тем, что из летнего полушария радиационное тепло переносится в зимнее полушарие. Механизм этого переноса связан с циркуляционной ячейкой Хэдли зимнего полушария и происходит за счёт её частичного смещения в летнее полушарие. В итоге со временем в одно полушарие тепла может поступать больше, чем в другое. С экстре-

ТРОПИЧЕСКИЙ ГОД И АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПОЛУГОДИЯ

Время, когда в Северном полушарии лето, а в Южном — зима, называется первым астрономическим полугодием. Время, когда в Северном полушарии зима, а в Южном — лето, называется вторым астрономическим полугодием. Тропический год и первое

астрономическое полугодие начинаются, когда Земля, двигаясь по орбите, оказывается в точке весеннего равноденствия. Далее Земля проходит точку летнего солнцестояния и идёт к точке осеннего равноденствия. В ней заканчивается первое астрономическое полугодие (летнее в Северном полушарии и зимнее в Южном). С точки осеннего равноденствия в Северном полушарии начинается зимнее полугодие, в Южном — летнее. Далее Земля проходит через точку зимнего солнцестояния и идёт к точке весеннего равноденствия, в которой заканчивается один тропический год и начинается следующий.



Малый ледниковый период — самый холодный период (XIV—XIX века) за последние две тысячи лет. Картина голландского живописца Хендрика Аверкампа «Зимняя сцена на замёрзшем канале» (1620 год) даёт представление о климате в Нидерландах в первой половине XVII века, который заметно отличается от нынешнего. Источник: Google Art Project/Wikimedia Commons/PD.

мальным значением этого фактора связан средневековый климатический оптимум, на который приходится время географической экспансии викингов — заселение Исландии и юга Гренландии.

Ещё один фактор — летняя инсоляция. Во-первых, при увеличении летней инсоляции повышается температура, а также испарение и содержание водяного пара в атмосфере. Это приводит к усилению парникового эффекта и выделению дополнительного тепла, вследствие чего происходит новое усиление испарения ит. д. Эти процессы, как уже отмечалось, многократно повторяясь, приводят к формированию механизма усиления потепления климата. Во-вторых, в результате роста инсоляции в летнее время возрастает выделение скрытого тепла из-за увеличения атмосферных осадков (переход водяного пара в воду и снег сопровождается выделением тепла). В-третьих, уменьшается альбедо за счёт сокращения площади морских льдов, ледников, сокращения продолжительности залегания снежного покрова. Это влечёт за собой увеличение поверхности облучения и нагревания (материков и океанов) и от неё — атмосферы. При сокращении летней инсоляции, очевидно, происходят обратные эффекты. С минимумом летней инсоляции связан, например, Малый ледниковый период в недавней климатической истории Земли.

Все отмеченные радиационные факторы действуют на природную систему Земли одновременно, изменяя её состояние, характеристикой которого является климат. Однако, в связи с изменением параметров орбитального движения Земли и наклона оси её вращения, регулирующих поступление и распределение солнечной радиации, вклад каждого фактора в изменение климата со временем меняется.

В эволюции современного глобального климата определяются две тенденции: его потепление и усиление неустойчивости. Обе эти тенденции обусловлены естественными причинами: усилением интенсивности меридионального переноса радиационного тепла (прежде всего, вихревыми образованиями), связанного с уменьшением угла наклона оси, и геодинамическим колебанием температуры поверхности океана с периодом около 60 лет.