

# ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, РЕАКЦИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

## GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGES, THE PERMAFROST ZONE RESPONSE AND ENGINEERING STRUCTURES STABILITY

**БРУШКОВ А.В.**

Заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета  
МГУ им. М.В. Ломоносова, д. г.-м. н, профессор, г. Москва,  
brouchkov@geol.msu.ru

**BROUCHKOV A.V.**

Head of the Geocryology Department of the Geology Faculty of  
the Lomonosov Moscow State University, DSc (doctor of science in  
Geology and Mineralogy), professor, Moscow, brouchkov@geol.msu.ru

**Ключевые слова:** глобальные изменения климата; криолитозона; мерзлые породы.

**Аннотация:** рассмотрены глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженерных сооружений. Показано, что повышение температур воздуха происходит во многих районах. Температуры мерзлых пород не всегда следуют за изменениями температур воздуха, но в целом необходимо учитывать повышение температур мерзлых толщ и возможные нарушения устойчивости инженерных сооружений.

### Введение

Многочисленные и часто угрожающие оценки будущих изменений климата и их последствий, распространившиеся в последнее время, несомненно, требуют пристального рассмотрения. На одной из международных конференций эти последствия называли «уступающими только мировой ядерной войне». Такого рода исследования не должны основываться на одной, даже всесторонне обоснованной, модели антропогенного влияния, но должны также учитывать исторические и естественные тенденции изменений климата.

Климат Земли подвержен изменениям в связи с событиями в космиче-

ском пространстве, геологическими процессами, а также из-за перемен в составе атмосферы. Однако эта связь, хотя и установлена, но недостаточно изучена количественно. Потепления и похолодания распространялись на большие территории, однако между ними существовали большие региональные различия. Компьютерные модели остаются несовершенными, потому что не учитывают всех факторов и условий.

При этом беспокойство вызывает возможность оттаивания мерзлых толщ, особенно засоленных, для которых оно возможно при отрицательных температурах. Это заставляет считать оценку их современного и будущего

состояния одной из приоритетных задач исследований.

### Изменения климата и их причины в прошлом

Климат Земли подвержен изменениям [4, 6, 33 и др.]. В геологической истории они были связаны с внутренним развитием планеты, а также с периодическими и случайными событиями в космическом пространстве, изменившими поток солнечной радиации, гравитационные и другие поля.

Геологическая история в фанерозое отличалась постепенным охлаждением Земли (рис. 1), связанным, по-видимому, с уменьшением концентрации углекислого газа в атмосфере в резуль-

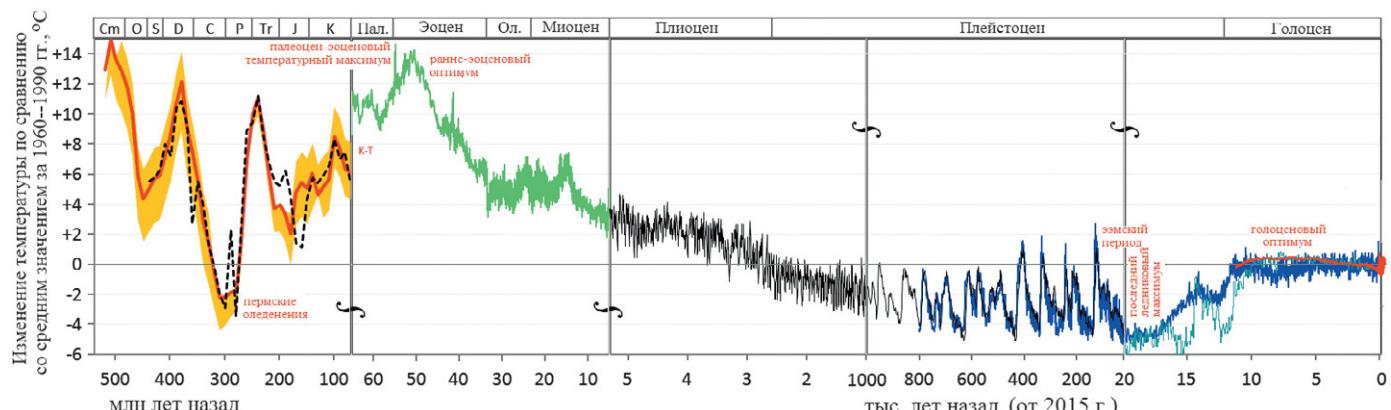


Рис. 1. Температурная история Земли в фанерозое: тренд к похолоданию, обусловленный снижением концентрации углекислого газа в атмосфере (по [50])

тате деятельности фототрофных растений и микроорганизмов. Действительно, как установил еще Аррениус, средняя температура Земли при отсутствии атмосферы была бы около минус 17 °C, а она составляет примерно плюс 15 °C, что обусловлено парниковым эффектом, наибольший вклад в который вносит именно углекислый газ. И пренебрегать этим мощным воздействием не следует.

При этом действуют и другие факторы. Так, медленная эволюция солнечной орбиты привела к изменению скорости Солнца от 250 до 287 км/с и расстояния от него до центра Галактики — от 8,7 до 10,2 кпс<sup>1</sup>. Пересекаемые им при этом потоки вещества наряду с пылью представлены газом и продуктами их конденсации. В период пребывания Солнечной системы в таком потоке на Землю, например, падает 100–1000 комет. Последний раз Солнце вошло в струйный поток рукава Ориона–Лебедя около 3 млн лет назад и вышло оттуда 0,7 млн лет назад.

Выделяются также следующие астрономические периоды для Земли: 90 тыс. лет — изменение эксцентриситета земной орбиты; 41 тыс. лет — изменение наклона эклиптики; 21 тыс. лет — изменение прецессии вращения. Считается доказанным, что, вариации этих характеристик, называемые циклами Миланковича, являются причинами длительных похолоданий и потеплений у земной поверхности (рис. 2).

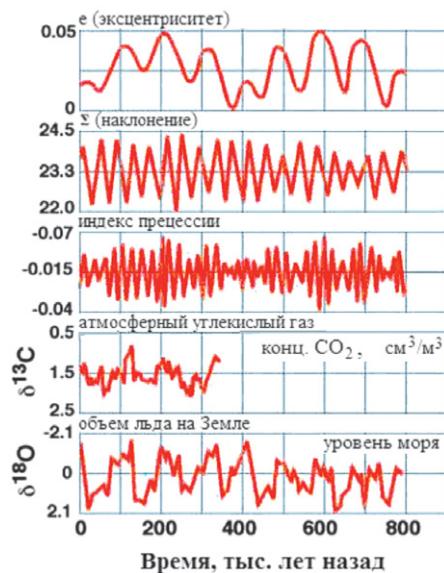
Приливные воздействия планет и Солнца формируют, в частности, общий цикл Солнечной системы длительностью 178,8 лет. Его гармоники являются важными составляющими в вариациях солнечной активности и температур воздуха у поверхности Земли. Известны и более короткие колебания, например 80-летний климатический цикл [5] и 11-летний цикл солнечной активности, при котором яркость Солнца изменяется на величины до 0,1% от средней. Кроме того, изменения в структуре океанов и континентов, обусловленные внутренними, тектоническими, а также космическими причинами, приводят к перестройкам климатической системы Земли.

Эпохи орогенеза сопровождались сильными как похолоданиями, так и потеплениями. Важную роль всегда играла атмосфера и содержание в ней парниковых газов (рис. 3). Глобальную температуру Земли в период от-

сутствия атмосферы 4,4–3,9 млрд лет назад оценивают величиной минус 33 °C. Потом, в интервале 4,0–3,5 млрд лет назад, за счет дегазации планеты и накопления CO<sub>2</sub> она могла увеличиться до плюс 40–60 °C, а 3,5–3,0 млрд лет назад — еще больше [16]. Уменьшение содержания в атмосфере углекислого газа за счет осаждения карбонатов и поглощения CO<sub>2</sub> растениями, снижение теплового потока из недр и образование суперконтинента привели к охлаждению Земли до плюс 10–15 °C и оледенению обширных территорий. Современная температура близка к этому значению, существовавшему около 1,2 млрд лет назад, и составляет 14,8–15,0 °C. В фанерозое глобальная температура была в пределах плюс 10–25 °C. В периоды потеплений в девонском, пермском периодах и мезозое она, вероятно, поднималась до плюс 20–25 °C.

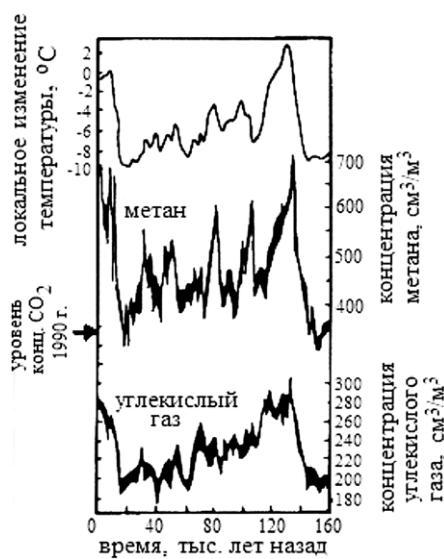
В геологической истории выделяются не менее четырех крупных ледниковых эр, каждая из которых состояла из нескольких ледниковых периодов. При этом древние температуры могли изменяться на 8–12 °C, а изменения температуры северной полярной области в последние 150 тыс. лет достигали 15 °C. Нынешняя ледниковая эра началась 20–30 млн лет назад в Южном и 3 млн лет назад в Северном полушарии (с длительностью ледниково-межледниковых циклов около 100 тыс. лет) и еще не закончилась. Последнее крупное похолодание около 20 тыс. лет назад понизило температуру в среднем по земному шару на 6–7 °C. Многие специалисты, продолжая этот тренд, считают, что ближайшие 50 тыс. лет будут характеризоваться похолоданием приблизительно на 5 °C (на 0,1 °C за 1 тыс. лет), вероятно с образованием обширного оледенения. Есть мнения, что очередное оледенение фактически уже началось около 5 тыс. лет назад.

Потепления и похолодания распространялись на большие территории, однако существовали региональные различия. Разность температур между полярными и экваториальными районами в каменноугольном периоде составляла, возможно, 40–55 °C и была причиной сильной атмосферной циркуляции. В плейстоцене в умеренных широтах среднегодовые температуры значительно изменялись. В это время в Европе температура по некоторым данным опускалась на 10–18 °C, а на северо-востоке Азии — на 5–12 °C ниже современной. Во время так называемого климатического оптимума голоцен,



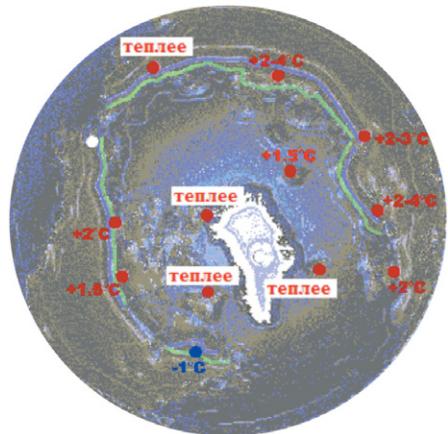
**Рис. 2. Соотношение астрономических циклов Миланковича (три верхние кривые), изменений содержания углекислого газа в атмосфере (четвертая сверху кривая) и объема льда на Земле (нижняя кривая) во времени (по [44]).**  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  — относительные отклонения соотношений содержания изотопов углерода ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) и кислорода ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) от такового для эталонных образцов

около 6 тыс. лет назад, наблюдалось значительное потепление, но только в Северном полушарии и неравномерное (рис. 4). По сравнению с современной зима в Евразии и Северной Америке на 70° с.ш. была, вероятно, теплее на 3 °C,



**Рис. 3. Сопоставление изменений во времени температуры (верхняя кривая) и содержания парниковых газов в атмосфере — метана и углекислого газа (соответственно — вторая и третья сверху кривые) — по результатам исследований ледяных включений (по [44]).**

<sup>1</sup> Килопарсек.



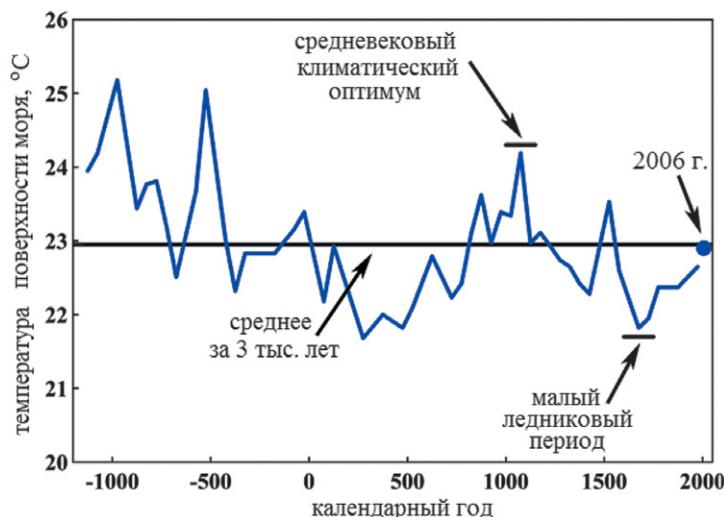
**Рис. 4. Разница между летними температурами во время климатического оптимума 6 тыс. лет назад и современными температурами (по [30])**

на 40° с.ш. — на 1 °С. Интересно, что 6 тыс лет развития цивилизации совпадают с самым теплым периодом за последние 100 тыс. лет. При этом само появление человека, возможно, совпало с довольно холодными временами.

Экстраполяция климатических кривых показывает, что через 4 тыс. лет должно наступить некоторое похолодание, а через 20 тыс. лет — значительное похолодание. Через 40 и 130 тыс. лет могут появиться обширные оледенения [10 и др.].

Сегодняшняя климатическая обстановка относится, по сути, к межледниковью, которое, правда, не является типичным (межледниковья до этого обычно были значительно холоднее). Около 1 тыс. лет назад, в период следующего потепления, викинги поселились на острове Гренландия, где росла зеленая трава (green — зеленый), а в Англии и на атлантическом побережье Канады рос виноград [32, 53] (рис. 5). Норвежское мореплавание и колонизация островов Северной Атлантики в конце 9-го столетия используются как доказательства того, что глобальный климат был тогда теплее, чем сегодня. Но еще через 500 лет, в районе 1450 года, наблюдалася так называемый малый ледниковый период, когда увеличивались горные ледники, зерновые культуры не давали урожаев, а люди голодали.

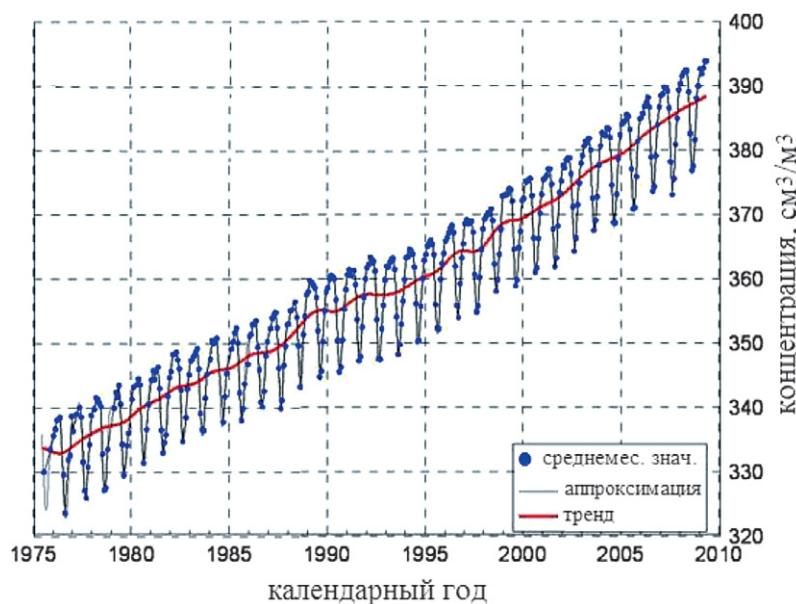
Необходимо иметь в виду, что древние климаты реконструируются главным образом по косвенным признакам, а настоящие термометры применяются лишь примерно в последние 150 лет. Связь климата с космическими факторами и геологическими характеристиками хотя и установлена, но недостаточно изучена количественно. Климаты



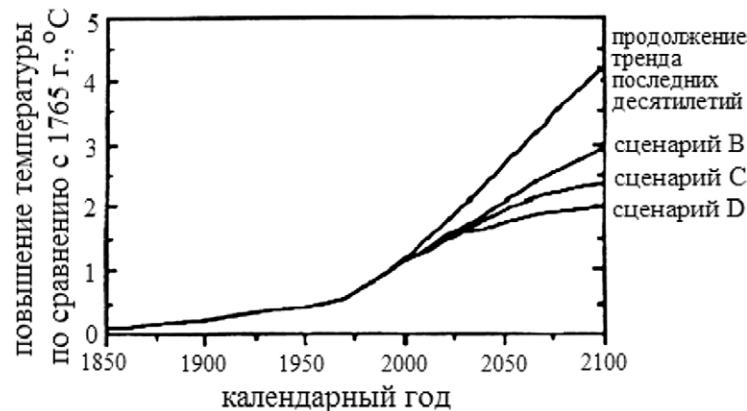
**Рис. 5. Температура поверхности океана за последние 3 тыс. лет (по [55])**

Земли изучены локально, в основном для давно освоенных территорий Западной Европы. При этом установлено, что имеются региональные различия.

Экстраполяции результатов измерений и соответствующие климатические прогнозы являются гипотетическими, основанными на небольшой продолжи-



**Рис. 6. Накопление углекислого газа в атмосфере (по [22])**



**Рис. 7. Повышение глобальной температуры Земли по различным сценариям (B, C, D) (по [44])**

тельности наблюдений. Поэтому данные такого рода могут рассматриваться лишь как качественные и предположительные характеристики климата.

#### Тенденции современных изменений климата

Излучение Солнца является определяющим: различное нагревание в экваториальных и полярных областях определяет циркуляцию атмосферы и океанов, что в значительной степени формирует климат. Континенты нагреваются и охлаждаются быстрее, чем вода, воздействуя на воздушные потоки. Климатическая система Земли — естественная динамическая система, поэтому человеческая деятельность ввиду ее увеличивающегося объема может оказывать влияние на климат.

В последнее время в центре внимания оказалась проблема глобального потепления, обусловленного парниковым эффектом в результате больших выбросов в атмосферу углекислого и некоторых других газов [6, 26, 39, 45, 46]. При этом содержание парниковых газов неуклонно увеличивается за счет антропогенных источников.

Прежде чем в результате антропогенной деятельности начал изменяться уровень содержания углекислого газа в атмосфере, его естественная эмиссия была почти полностью сбалансирована естественными процессами, которые удаляли его, например фотосинтезом растений, выветриванием горных пород, растворением  $\text{CO}_2$  в океане. Количество углекислого газа в атмосфере за последние 10 тыс. лет изменилось очень немного [38].

Сейчас, хотя океаны и леса и поглощают приблизительно половину углекислого газа, выделяемого промышленностью, остальная его часть остается в атмосфере [28]. В результате уровень  $\text{CO}_2$  в атмосфере теперь в среднем почти на 40% выше, чем в доиндустриальное время (рис. 6).

Современные климатические прогнозы основываются на компьютерном моделировании [45]. Расчеты показывают, что нагревание из-за парникового эффекта доминирует над другими важными факторами. Эти факторы включают присутствие в атмосфере отражающих свет пылеватых частиц в результате вулканических извержений и сжигания топлива и естественные изменения климата.

Компьютерные модели остаются несовершенными, потому что они не учитывают всех факторов и условий. Так, недавние прогнозные оценки метеоро-

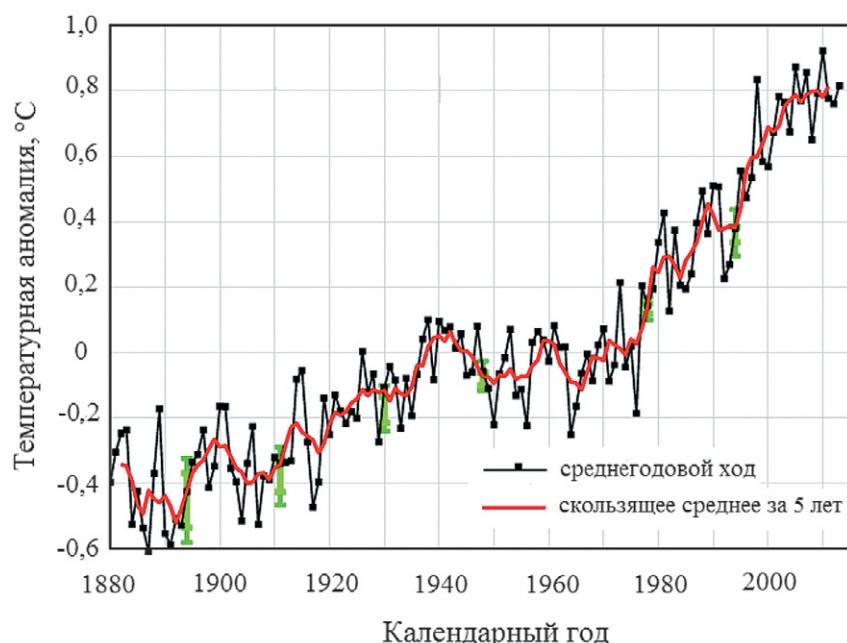


Рис. 8. Изменения глобальной температуры воздуха у земной поверхности за период метеорологических наблюдений (по [34])

логов о возможности двукратного увеличения эквивалента углекислого газа в атмосфере к середине следующего столетия сменились более осторожными предсказаниями — в 1,42 раза к 2050 году и в 1,77 раза к 2100 году [38, 39]. По результатам расчетов, при удвоении содержания углекислого газа повышение глобальной температуры может достигнуть 3 °C и более. По другим оценкам, максимальное изменение температуры

составляет 2,0–2,5 °C. Межправительственный Совет ООН (IPCC) предсказывает повышение средней глобальной температуры приблизительно на 1,0–3,5 °C к 2100 году (рис. 7).

Действительно, по результатам измерений установлено, что среднегодовая глобальная температура за 170 лет повысилась приблизительно на 0,5 °C (рис. 8). За последние 25–30 лет она выросла на 0,4 °C. При этом 1990-е го-

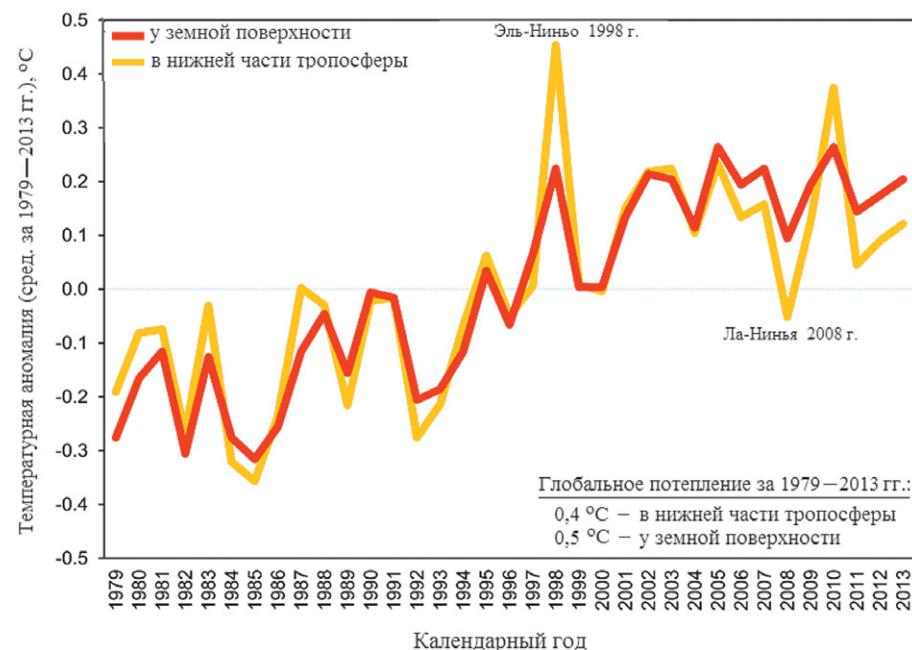
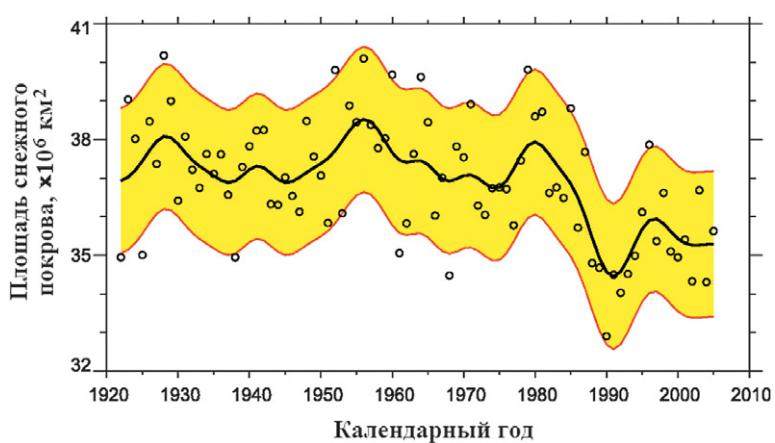
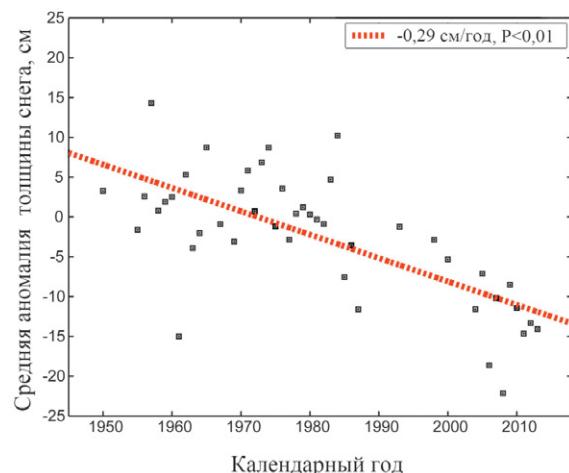


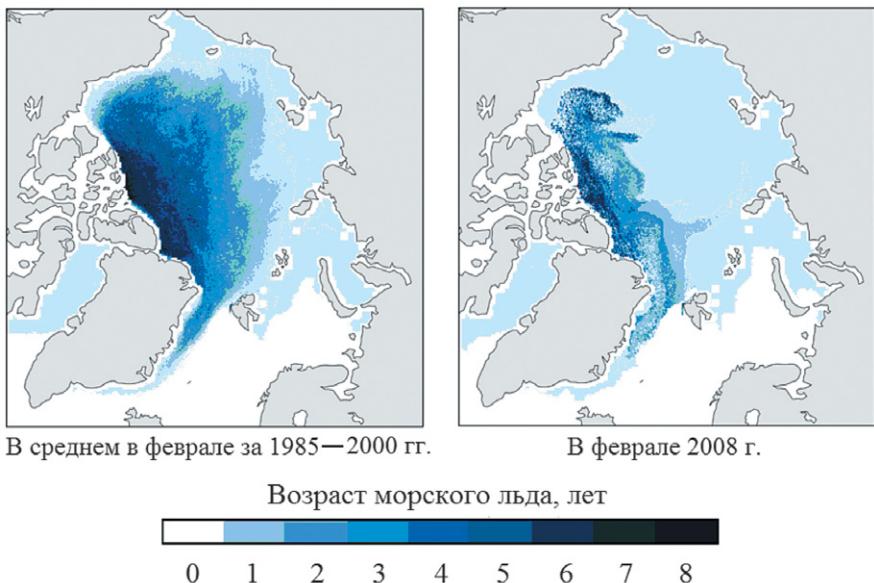
Рис. 9. Среднегодовые температурные аномалии воздуха у земной поверхности и в нижней части тропосферы в 1979–2013 гг. (по [28]). Эль-Ниньо (El Nino) — потепление поверхностного слоя воды в центральной и восточной части тропической и экваториальной зоны Тихого океана, имеющее заметное влияние на климат; Ла-Нинья (La Nina) — аномальное понижение температуры поверхностного слоя воды в той же зоне (эти два явления сменяют друг друга с периодичностью около 1,5 лет)



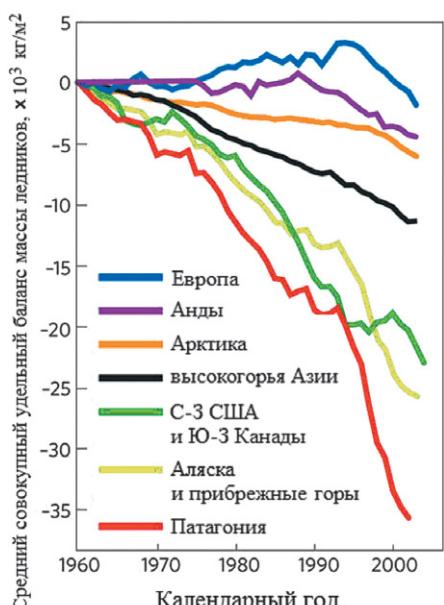
**Рис. 10. Площадь снежного покрова в марте — апреле в Северном полушарии**



**Рис. 11. Изменение толщины снега в Арктике на поверхности морского льда (по [54]).  $P$  — доверительная вероятность**



**Рис. 12. Изменения возраста морских льдов в Арктике (по [43])**



**Рис. 13. Баланс массы ледников в мире (по [31])**

ды были самым теплым десятилетием прошлого тысячелетия. Правда, поверхностные температурные данные неполны из-за неучета теплоты, выделяющейся городскими агломерациями. Последнее десятилетие значительное повышение температуры отмечают метеорологи Аляски, северо-запада Канады, некоторых районов центральной Сибири. Среднегодовая температура там поднимается в среднем на  $0,75^\circ\text{C}$  за десятилетие. При этом, однако, надо отметить, что в самые последние годы наметилось снижение роста температуры воздуха (рис. 9).

Тот факт, что потепление на Земле происходит, установлен, но остается неясным, способствуют ли естественные причины этой тенденции или наоборот, сохранится ли эта тенденция в будущем, если учесть другие возможные факторы [11, 35, 36].

Наблюдаются некоторые признаки изменений и в водном цикле. Так, в Соединенных Штатах с начала столетия количество атмосферных осадков увеличилось примерно на 6%, частота интенсивных дождей и снегопадов выросла на 20% [40]. Толщина снега и возраст морских льдов на Земле уменьшаются (рис. 10–12). Косвенным свидетельством изменений климата служат ледники (рис. 13). Например, данные по Ронскому леднику (Rhone Glacier) в Швейцарии показывают, что за последние 100 лет он уменьшился наполовину. В большинстве регионов мира масса ледников уменьшается, однако есть ряд исключений (в Европе, на Алтае), а баланс крупнейших ледников, в частности Гренландского и Антарктического, оценить трудно, но и их масса, по последним данным, снижается [28]. Глетчер Беринга на Аляске площадью 5200  $\text{km}^2$  с 1972 по 1991 год уменьшился на 20%. Считается, что в целом площадь морских льдов Арктики с 1978 года значительно уменьшилась (рис. 14), но с большими изменениями от года к году. Толщина льда также уменьшается (рис. 15), как и площадь снежного покрова (рис. 16).

Предстоящие изменения глобального климата оцениваются неоднозначно: разрабатываются сценарии не только значительного потепления, но и похолодания. Несмотря на то что невозможно отрицать увеличивающийся парниковый эффект, есть и противники глобального потепления, считающие, что естественные колебания климата еще плохо изучены. Эксперты не обладают достаточными знаниями о величинах естественных климатических изменений — в частности, это касается солнечной радиации. Есть и другие не вполне ясные,

но значительные, если не определяющие, факторы — прежде всего влияние способности океана к поглощению углекислого газа, карбонатного равновесия, водного пара, аэрозолей, запыления снега и атмосферы, поглощающей и выделяющей способности биоты, тектонических разломов, вулканических извержений, трангрессии океана.

Существует мнение, что спутниковые методы ненадежны, но фактически на сегодняшний день они дают наиболее точные значения глобальной температуры, потому что охватывают 99% поверхности Земли [45, 47]. Некоторые результаты измерений с использованием воздушных шаров, как и данные изучения годичных колец деревьев в Северном полушарии, свидетельствуют о снижении температуры до  $0,4^{\circ}\text{C}$  за десятилетие [37] (рис. 17).

Таким образом, несмотря на увеличение содержания углекислого газа в атмосфере при его известном отепляющем эффекте, данные измерений температуры не вполне однозначны [51]. Поэтому прогнозы климатологов становятся все более осторожными, а их критики все настойчивее требуют не накладывать суровые ограничения на развитие промышленности.

#### Глобальные и локальные изменения

Даже небольшие глобальные изменения могут сопровождаться большими региональными сдвигами климата. Считается, что в высоких широтах потепление будет более значительным. По предположению М.И. Будыко, если к 2050 году среднее глобальное потепление на широте  $60^{\circ}$  будет на  $2,5\text{--}5,0^{\circ}\text{C}$ , то на широте  $80^{\circ}$  оно будет уже на  $6\text{--}11,5^{\circ}\text{C}$ . Однако этот вывод не является бесспорным.

За весь период метеорологических наблюдений длительностью 150–180 лет тренд к повышению температуры воздуха в арктических районах России проявляется, но он пока невелик (табл.). То же самое отмечается на Аляске. Выделяются два периода выраженного увеличения температуры воздуха:

- с конца 19 века до 1950-х годов («потепление Арктики»);
- с середины 1960-х годов до настоящего времени (см. табл.).

Соответственно, можно также выделить период похолодания между этими двумя потеплениями.

Точки зрения специалистов на прогноз температур для севера России не вполне согласуются между собой. Некоторые подсчеты свидетельствуют о заметном потеплении. Наибольший

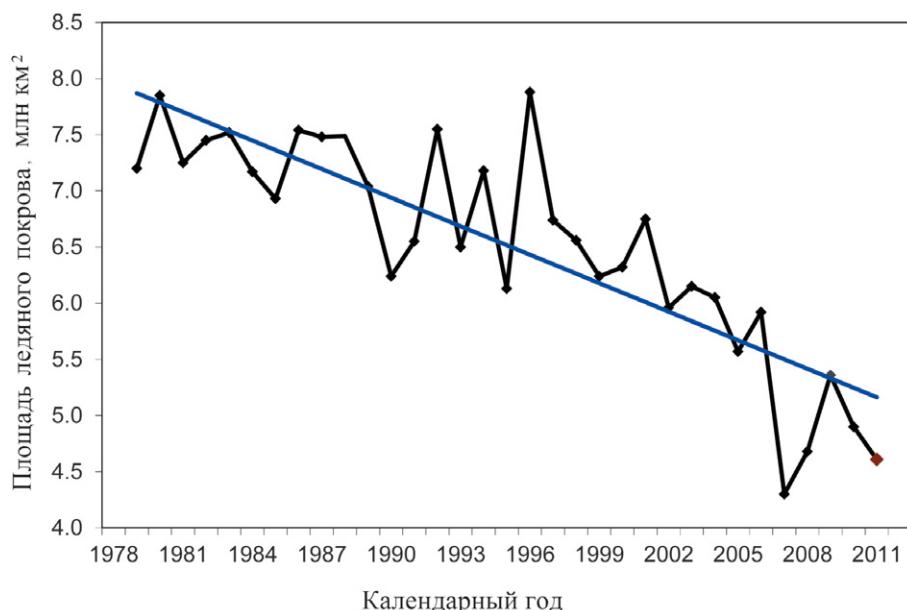


Рис. 14. Среднемесячная площадь ледяного покрова Северного Ледовитого океана в сентябре за 1979–2011 гг. (по [21])

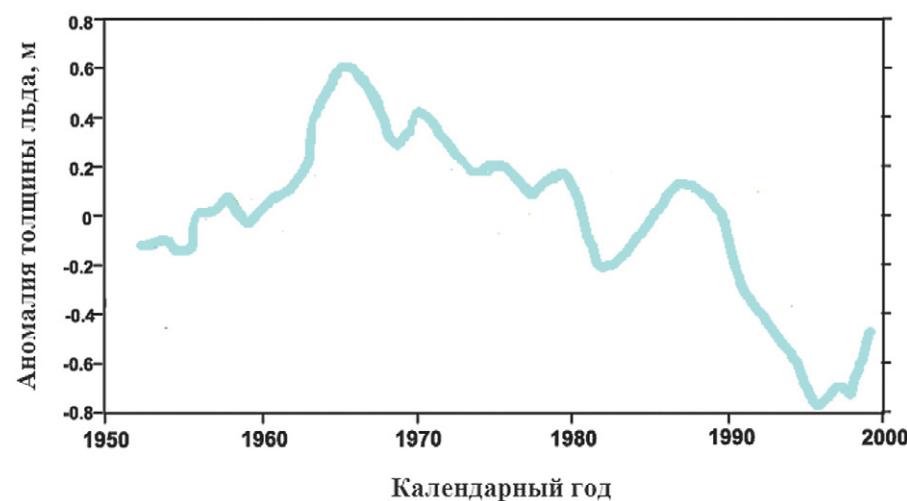


Рис. 15. Аномалии толщины льда в Арктике (по [28])

тренду к повышению температуры с серединой 1960-х годов был получен для севера Западной Сибири (п. Тазовский,

г. Салехард, г. Надым) и Якутии. Однако температура воздуха на севере европейской части России изменилась слабо

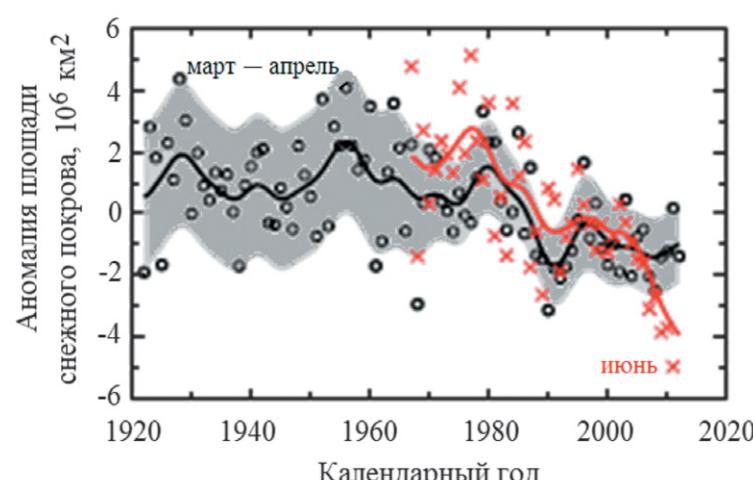


Рис. 16. Сокращение площади снежного покрова в Северном полушарии (по [28])

Таблица

## Среднегодовые температуры воздуха на севере России в 1960–2005 гг. (по [11])

Регион	Период, гг.					
	1951–1960	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2005
Север европейской части России	-3,5	-4,4	-4,3	-3,8	-3,8	-3,5
Север Западной Сибири	-7,3	-8,0	-8,0	-6,9	-6,8	-6,7
Якутия	-11,3	-11,2	-11,0	-10,6	-9,7	-9,7
Северо-восток России	-5,5	-5,6	-5,6	-5,1	-4,9	-4,9

бо (на 0,6–0,8 °C за 1965–1995 гг.). Измерения показывают, что и для севера Западной Сибири, и для севера европейской части России в целом характерно некоторое отставание от глобального тренда к потеплению (рис. 18).

Метеорологические данные для территории Северной Америки свидетельствуют о весьма заметном потеплении на Аляске, в Канаде, о менее ярко выраженном потеплении на западном побережье США, но о незначительных изменениях

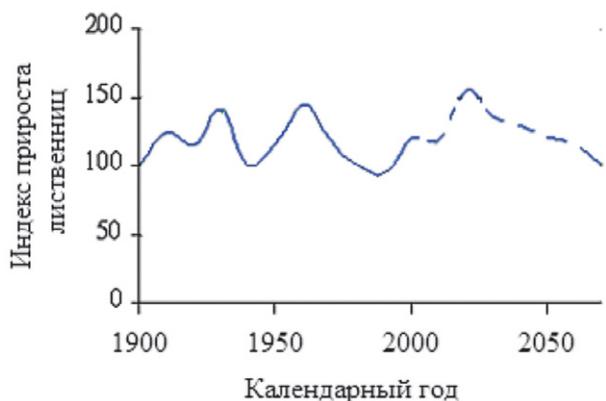


Рис. 17. Десятилетние средние индексы прироста лиственицы Тазовской лесотундры, зависящие от температуры воздуха, и их прогноз на основе подсчета годичных колец с 1100 г. (по [2])

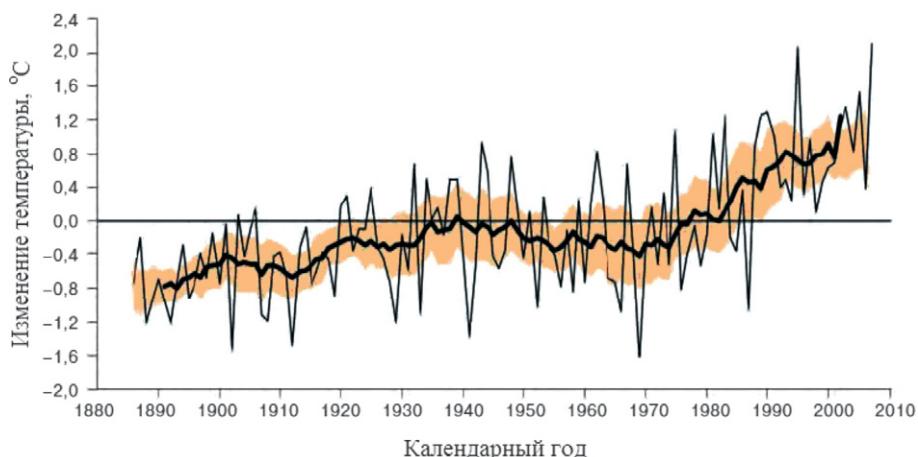


Рис. 18. Изменения (отклонения от средних значений) осредненной по России среднегодовой приземной температуры воздуха за 1961–1990 гг. Тонкая ломаная линия — результаты наблюдений по станциям, жирная ломаная линия — слаженный ход температуры воздуха (11-летние скользящие средние), На фоне устойчивого повышения температуры за последние примерно 35 лет наблюдаются значительные межгодовые колебания средней температуры (по [12])

и даже о похолодании в центральной и восточной частях этого континента [1, 28]. Некоторое похолодание вдоль восточного побережья Северной Америки, наблюдавшееся в 1976–1985 годах, в последующем прослеживается только в наиболее северной его части. За 100 лет район Маккензи нагрелся на 1,5 °C, область тундры в целом — на 0,5 °C, в то время как горы и фьорды восточной части североамериканской Арктики испытывали похолодание.

Температурные изменения на большей части территории Европы пока неизвестны, но тренд к потеплению проявляется.

Данные об изменениях температуры вдоль арктического побережья достаточно немногочисленны. До конца 1960-х годов иногда даже происходило некоторое понижение температуры, но теперь и в целом потепление ощущается и там (рис. 19).

Наиболее ярким и неоспоримым свидетельством потепления является постоянное повышение температуры поверхностных слоев Мирового океана (рис. 20).

#### Общие последствия изменений климата

Последствия изменений климата многообразны [28, 57]. Если произойдет протаивание мерзлых толщ в криолитозоне, то из-за значительного содержания в них льда средняя осадка грунтов может составить 10 м и более. Поэтому в силу широкого распространения многолетнемерзлых грунтов (более 65% территории России) климатический и геокриологический прогнозы должны быть выполнены с максимальной возможной надежностью.

За счет дальнейшего таяния ледников уровень океана может подняться на 1–3 м. Так, в прошлые периоды микулинского (125 тыс. лет назад, температура выше современной на 1,8–2,0 °C) и голоценового (6 тыс. лет назад, температура выше на 0,8–1,0 °C) потеплений море далеко заходило на материк. За последние 5 тыс. лет береговая линия полуострова Ямал сместилась в сторону суши на 15–20 км, а сейчас она смещается со скоростью до 4–6 м в год и более. Объем влагозапасов на севере Западной Сибири может вырасти на 20–40%, что приведет к сильному заболачиванию и затоплению.

Таким образом, обоснованную оценку возможных изменений климата и их последствий для северных территорий России следует выполнить в ближайшее время.

В целом, нефтяные и газовые компании могут извлечь выгоду из последствий глобального потепления и смягчения климата, особенно ввиду сокращения продолжительности существования, распространения и мощности ледяного покрова. Бурение скважин на северном побережье будет технически проще и дешевле. Если исчезнет мерзлота, то теоретически после катастрофических изменений поверхности суши на ней удастся строительство дорог, взлетно-посадочных полос, трубопроводов, линий энергоснабжения и связи, предприятий и зданий, сезон навигации в Арктическом бассейне расширится и станет возможным простой транзит вдоль побережья Евразии к Северной Америке, сезон речной навигации также продлится, во многих северных районах возникнут сельскохозяйственные перспективы.

Уровень Мирового океана повысился за последние 100 лет на 10–25 см, как считают, из-за теплового расширения воды и таяния ледников.

Самые крупные Антарктический и Гренландский ледяные щиты содержат большую часть льда Земли. Если бы эти ледники растаяли полностью, уровень океана поднялся бы более чем на 80 м. Текущие оценки, однако, показывают, что эти ледники находятся в приблизительном равновесии, поэтому в настоящее время не воздействуют на уровень моря.

Повышение уровня Мирового океана привело бы к существенной потере прибрежных земель в Соединенных Штатах (особенно в южной части атлантического побережья), Европе и на арктическом побережье России (в основном в низменной части Западной Сибири и на других низменностях). В литературе можно встретить мнение о связанных с изменениями климата увеличении интенсивности и частоте бурь и ураганов [28].

#### Воздействие изменений климата на криолитозону

Прогнозы изменений северного климата и криолитозоны различны и в ряде случаев противоречат друг другу [1, 18, 20, 23, 25, 42, 48, 49, 58]. В северных районах России работает около 40 метеостанций и более 10 геокриологических стационаров. Ряды метеорологических наблюдений охватывают 180 лет, а геокриологических — 30–35 лет, однако эти данные продолжают нуждаться в дальнейшем изучении.

Некоторые оценки показывают, что в целом температура воздуха в криолито-

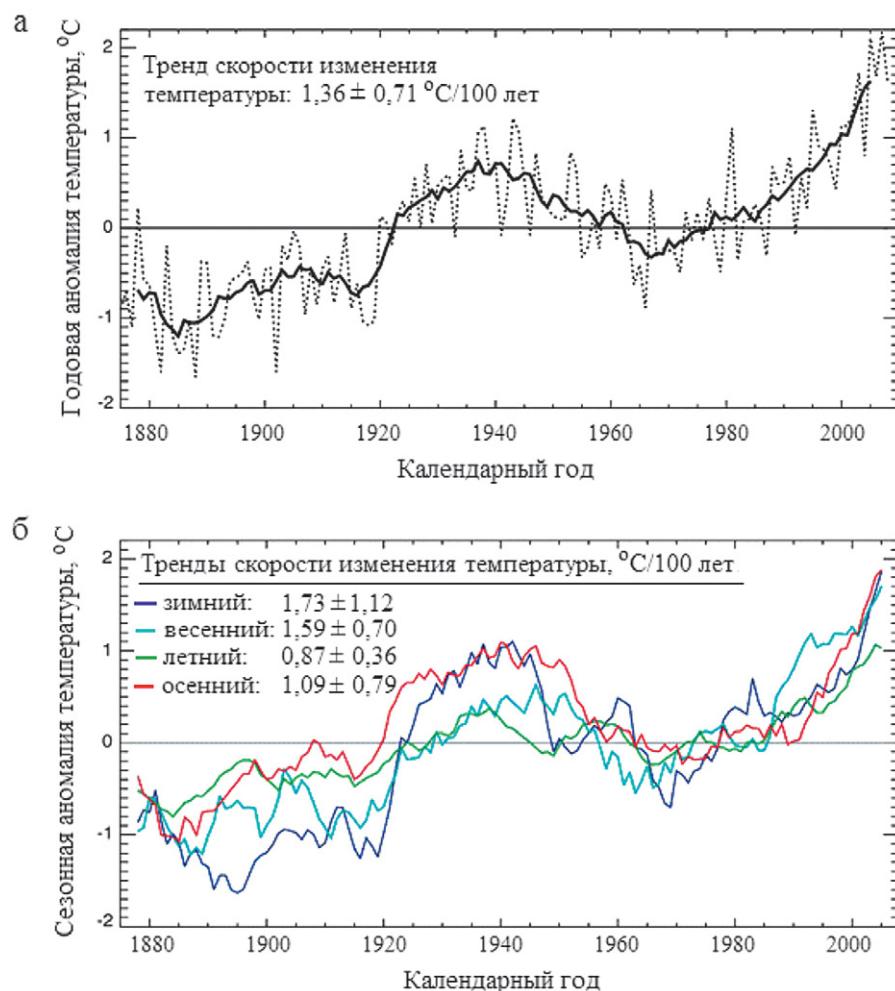


Рис. 19. Изменения среднегодовой температуры в Арктике севернее 59° с.ш. (по [24]): а — годовые аномалии; б — сезонные аномалии

зоне повысилась на 0,2–2,5 °C. При этом увеличение температур мерзлых пород достигает 1,0–1,5 °C и распространяется до глубины 60–80 м (рис. 21–27). В соответствии с данными оценками, в Западной Сибири в ближайшие 20–25 лет южная граница мерзлоты может переместиться на 50–80 км к северу, южная граница сплошной криолитозоны — на 150–200 км к северу, повышение температуры в сплошной криолитозоне к 2050 году достигнет 1,5–2,0 °C. Прогнозируемая ширина области образования

перелетков и несливающейся мерзлоты составит 500–600 км в Западной Сибири и 150–300 км на Европейском Севере России [17]. Процессы термоэррозии и термокарста могут активизироваться, а площадь развития морозобойного расщеливания, наоборот, сократится [7]. По данным 14 метеостанций в зоне «ямальского субмеридиона» от острова Белый до города Тобольск повышение температуры за последние 25–30 лет оценивается величиной 0,8–1,6 °C и не связано с широтой. По другим данным, в

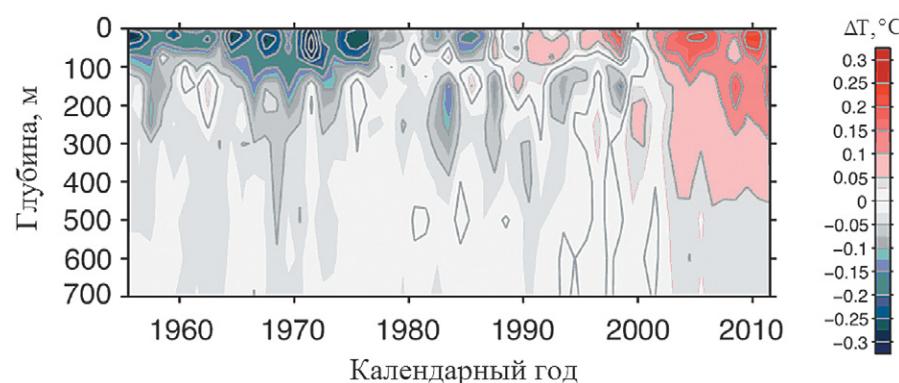


Рис. 20. Изменения средней температуры ( $\Delta T$ ) поверхностного водного слоя океана (по [28])

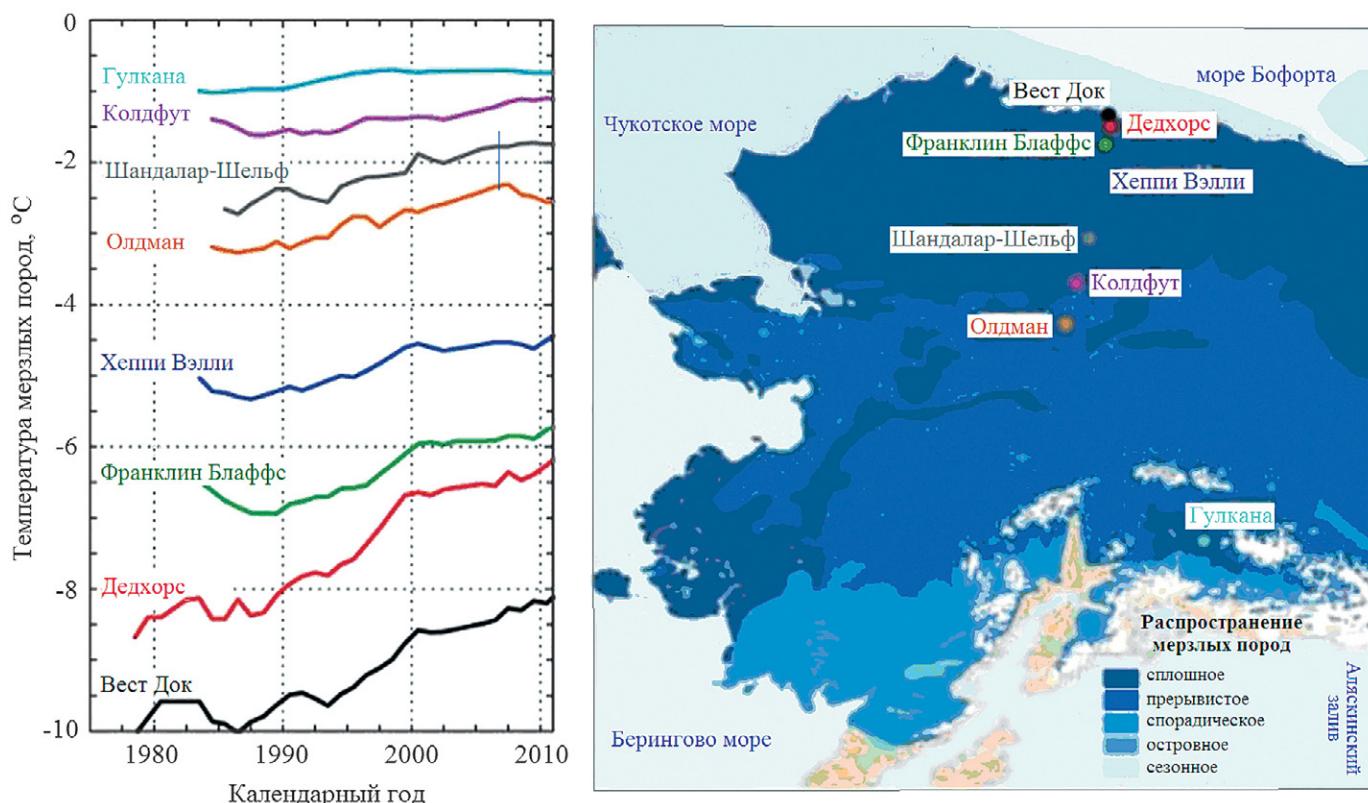


Рис. 21. Изменения среднегодовой температуры мерзлых пород на Аляске (по [49])

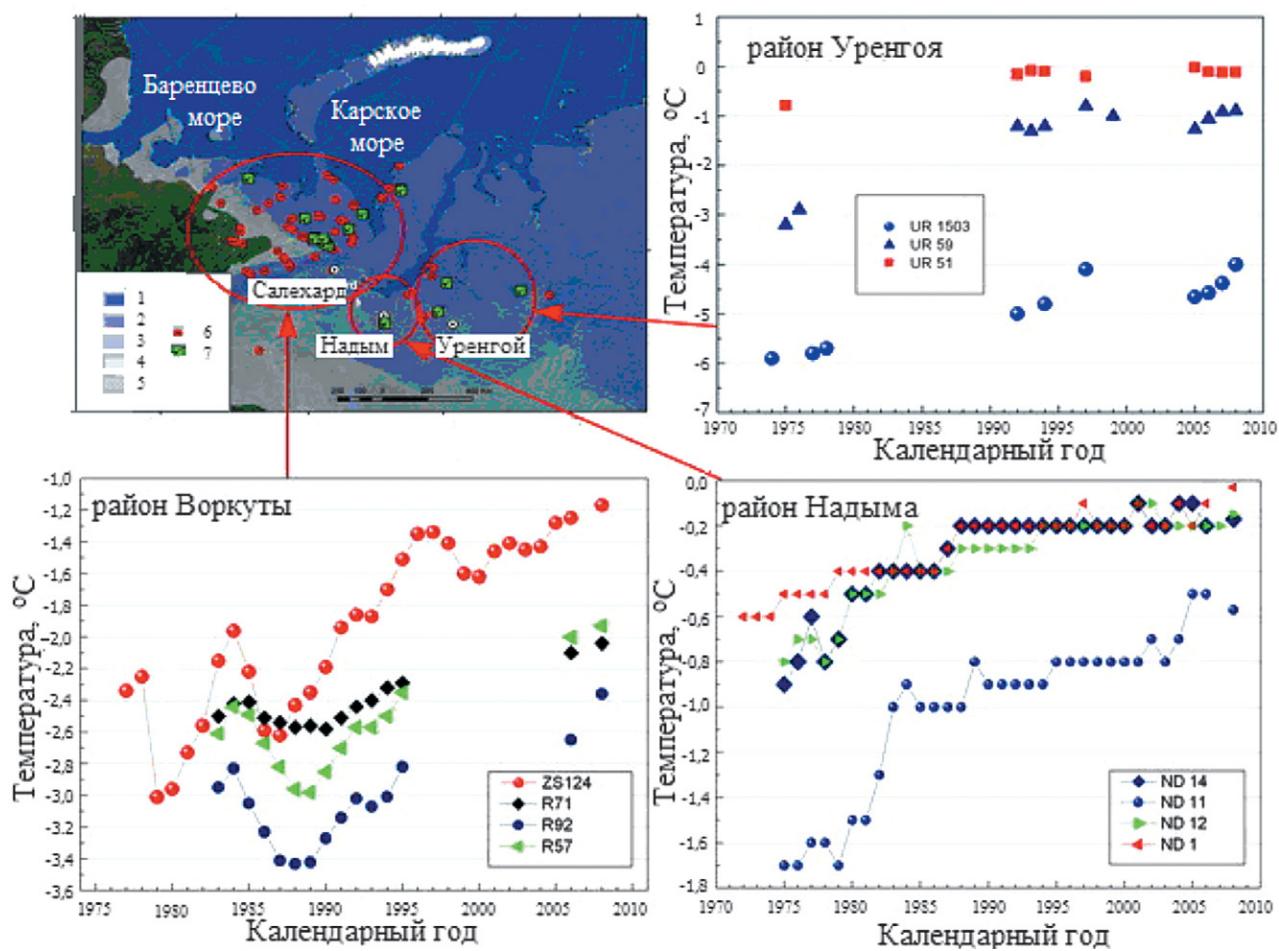


Рис. 22. Изменения среднегодовой температуры мерзлых пород на Европейском Севере России и в Западной Сибири (по [48]). Условные обозначения: 1–5 — распространение мерзлоты: 1 — сплошное, 2 — прерывистое, 3 — спорадическое, 4 — островное, 5 — реликтовое; 6 — скважины; 7 — кусты скважин; ZS124, R71, R92, R57, UR1503, UR59, UR51, ND14, ND11, ND12, ND1 — номера скважин

последние 30–40 лет местами наблюдается даже увеличение площади распространения, температуры и глубины мерзлых толщ, а местами изменений нет.

Увеличивается количество летних и зимних осадков. Например, на Западном Ямале (на мысе Марре-Сале) оно составляет сейчас 5 мм/год. Косвенные доказательства свидетельствуют о тенденции к возрастанию отложений снега на севере Аляски и Евразии [18]. Отепляющее влияние снежного покрова приводит к увеличению температур мерзлых пород.

Если значительного повышения температуры не произойдет, широкое распространение засоленных мерзлых грунтов (рис. 28) на Арктическом побережье может значительно осложнить последствия даже небольших изменений климата. Такие грунты имеют особые свойства, характеризуются низкой несущей способностью и как объекты исследований занимают промежуточное положение между мерзлыми и немерзлыми породами. Они замерзают и, что в данном случае более важно, оттаивают при более низких температурах, содержат больше незамерзшей воды, чем обычные мерзлые грунты, что вместе с другими особенностями их состава и строения определяет их своеобразие и отличия от незасоленных мерзлых грунтов по физическим характеристикам, деформируемости, прочности и другим свойствам. При некотором потеплении климата, даже если температура грунтов останется отрицательной, толщи мерзлых засоленных пород могут оттаять или потерять несущую способность, что заставляет считать оценку их современного и будущего состояния одной из приоритетных задач исследований.

Из результатов расчетов следует, что в естественном ходе эволюции температурное поле в криолитозоне перестраивается, но ожидать существенных изменений в Арктике в связи с короткими колебаниями температуры с амплитудой 1–2 °C не следует. На основе существующих представлений о закономерностях формирования температурного режима многолетнемерзлых толщ с использованием любого из сценариев глобального потепления можно дать количественную оценку деградации криолитозоны и оценить возможные последствия этого процесса. На рисунке 29 для примера представлен прогноз деградации криолитозоны севера Западной Сибири к 2100 году по сценарию Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН.

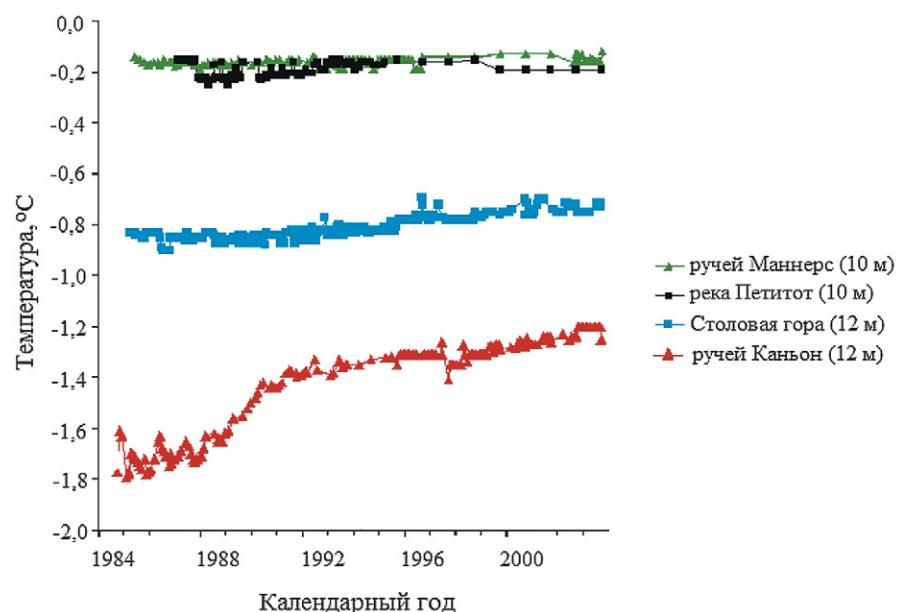


Рис. 23. Температуры мерзлых пород в Канадской Арктике (Долина Маккензи, юг района Норман-Уэллс) (по [52]). 10, 10, 12, 12 м — глубина измерений

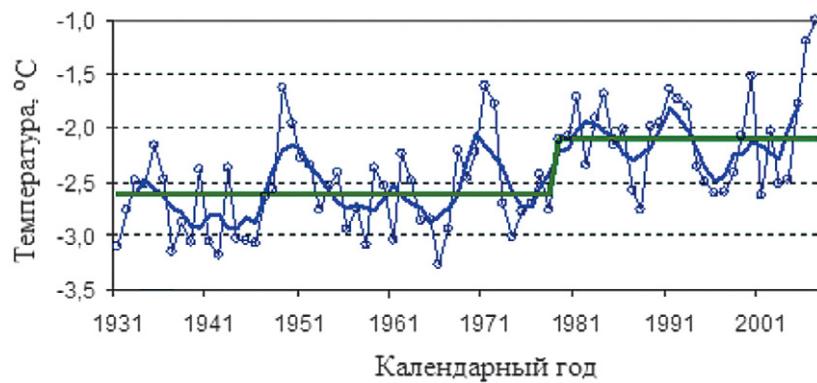


Рис. 24. Температура мерзлых пород в Центральной Якутии (г. Покровск, глубина измерений 3,2 м) (по [18])

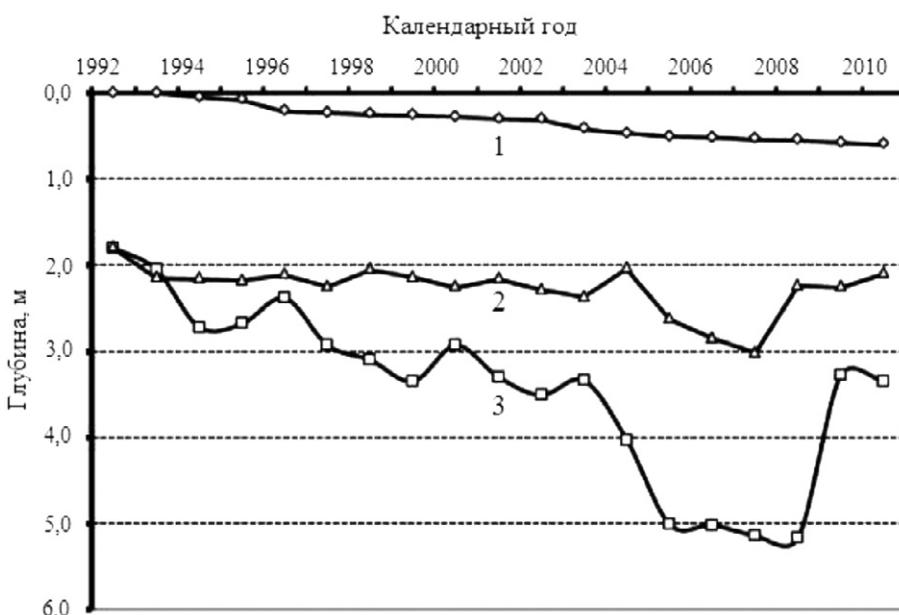


Рис. 25. Динамика оседания земной поверхности (1) и увеличение глубины залегания кровли пород ледового комплекса (2 — на ровном участке; 3 — в месте термопросадки) на площадках № 2 и 4 полигона «Дыргыбай» в 1992–2010 гг. (по [15])

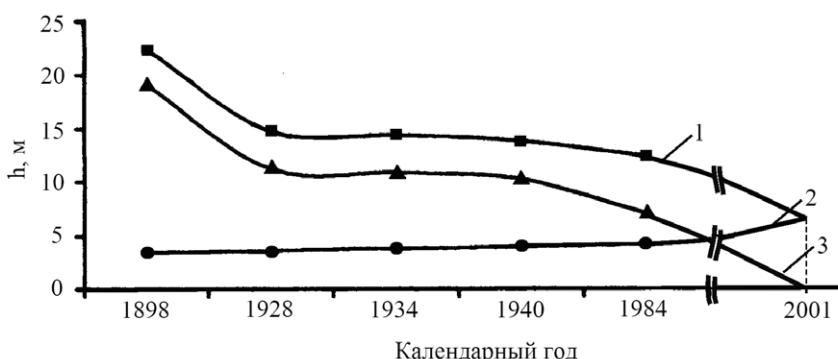


Рис. 26. Изменение мощности (3) и глубины залегания верхней (1) и нижней (2) границ криолитозоны ( $h$ , м) в Южном Забайкалье на широте 50°23' в XX столетии (по [19])

### Заключение

Климат Земли подвержен изменениям в связи с периодическими и случайными событиями в космическом пространстве, геологическими процессами и вариациями в составе атмосферы. Однако такие связи хотя и установлены, но недостаточно изучены количественно. Экстраполяции результатов измерений и соответствующие климатические прогнозы являются гипотетическими, основанными на небольшой продолжительности наблюдений. Потепления и похолодания распространялись в прошлом на большие территории, однако между ними существовали

значительные региональные различия. Поэтому и прогнозы изменений климата и их последствий для любого района, в том числе для арктического побережья, должны быть локальными.

В последнее время активно разрабатывается концепция глобального потепления, имеющая бесспорные основания. В целом установлено, что потепление на Земле происходит, но связано ли это только с накоплением парниковых газов антропогенного происхождения, способствуют ли естественные причины этой тенденции или наоборот и сохранится ли эта тенденция в будущем, остается неясным. За весь период метеорологи-

ческих наблюдений длительностью 150–180 лет тренд к повышению температуры воздуха в арктических районах России проявляется, но пока он не очень существенный. Так, для Западной Сибири речь, по-видимому, пойдет не о полном протаивании многолетнемерзлых толщ, а лишь о повышении их температур у поверхности примерно до минус 1 °C. К 2075 году предполагается увеличение температуры первых 10 м многолетнемерзлых пород до 0 °C, а к 2100 году возможно многолетнее оттаивание верхнего слоя мощностью 3–5 м.

Таким образом, до 2075 года катастрофического усиления развития термокарстовых и термоэррозионных процессов в Западной Сибири ожидать не следует. Естественно, на юге деградация мерзлых толщ будет происходить интенсивнее, чем на севере, где многолетнего оттаивания, скорее всего, не произойдет.

В Восточной Сибири и Якутии также возможно повышение температур грунтов оснований.

При этом особое беспокойство вызывает возможность протаивания мерзлых грунтов, особенно засоленных, для которых оттаивание возможно уже при отрицательных температурах. Поэтому

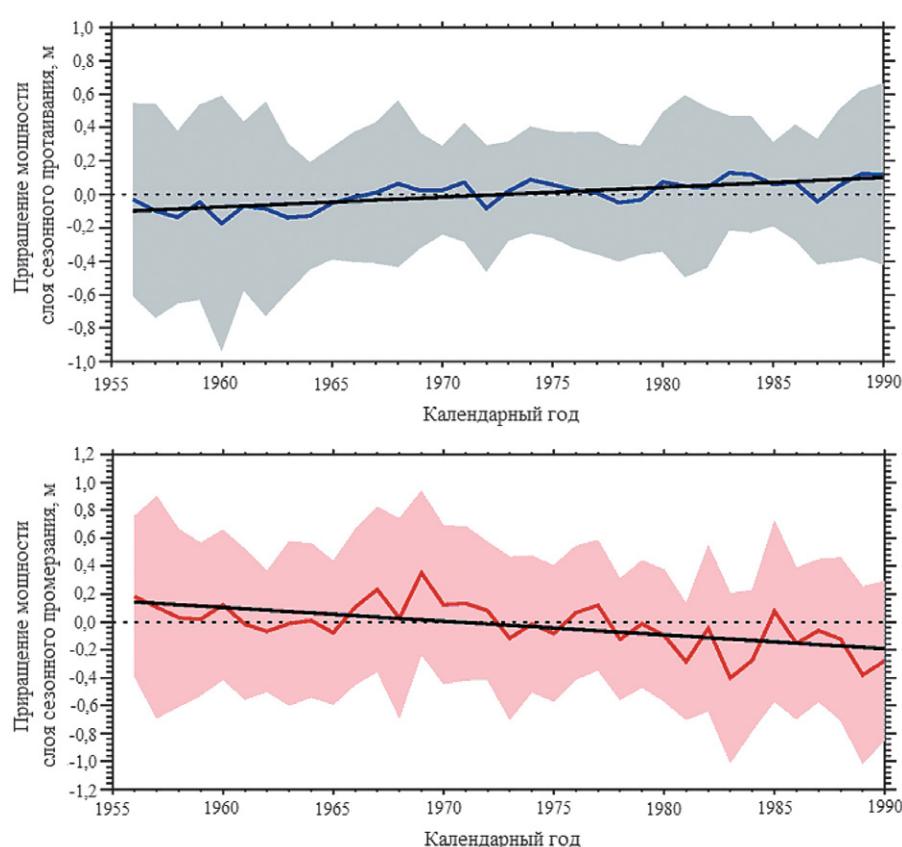


Рис. 27. Изменения мощности слоя сезонного протаивания (а) и сезонного промерзания (б) в среднем по России (по [36]). Пунктиром показаны горизонтальные линии, соответствующие нулевым приращениям

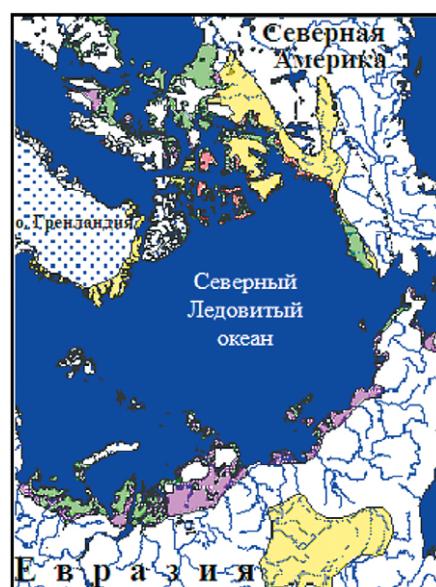


Рис. 28. Схема распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов различных типов в Северном полушарии, составленная автором: желтый цвет — континентальное (преимущественно сульфатно-карбонатное) засоление; зеленый — морское (преимущественно хлоридно-натриевое) засоление морских отложений; розовый — смешанное засоление; фиолетовый — морское засоление континентальных и морских отложений

оценка их современного и будущего состояния должна быть одной из приоритетных задач исследований.

Повышение температур мерзлых толщ и соответствующее увеличение глубины сезонного оттаивания приведет к уменьшению несущей способности оснований инженерных сооружений и риску развития их деформаций. По сути дела, мы пока не знаем, что происходит с температурами мерзлых пород на огромных территориях. Состояние городских агломераций также изучено недостаточно хорошо. Поэтому одной из основных задач геокриологии является организация и проведение мониторинга состояния криолитозоны и инженерных сооружений в ее пределах.



**Рис. 29. Прогнозная геокриологическая карта севера Западной Сибири на 110-й год от начала возможного глобального потепления (по сценарию Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН)**

## Список литературы

- Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э., Павлов А.В. Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в 21 веке // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 4. С. 15–25.
- Берри Б.Л. Основные системы геосферно-биосферных циклов и прогноз природных условий // Биофизика. 1992. Т. 37. № 3. С. 414–428.
- Борисенков Е.П. Изменение климата и человек. М.: Знание, 1990. 64 с.
- Будыко М.И., Борзенкова И.И., Менжулин Г.В., Селяков К.И. Предстоящие изменения климата // Известия АН СССР. Сер. Географическая. 1992. № 4. С. 36–52.
- Гедеонов А.Д. Изменения температуры воздуха на Северном полушарии за 90 лет. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 145 с.
- Глобальное потепление: доклад Гринпис. М.: Изд-во МГУ, 1993. 272 с.
- Гречищев С.Е. Прогноз оттаивания и распределения вечной мерзлоты и изменения криогенного растрескивания грунтов на территории России при потеплении климата // Криосфера Земли. 1997. Т. 1. С. 59–65.
- Ериков Э.Д. Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 2. С. 70–74.
- Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 287 с.
- Кузнецов О.Л., Берри Б.Л., Баренбаум А.А. Природные циклы и экологическое прогнозирование // Циклы природных процессов, опасных явлений и экологическое прогнозирование. 1991. Вып. 1. С. 6–26.
- Мельников В.П., Павлов А.В., Малкова Г.В. Геокриологические последствия современных изменений глобального климата // География и природные ресурсы. 2007. № 3. С. 19–27.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2008. 29 с. URL: [http://climate2008.igce.ru/v2008/pdf/resume\\_ob.pdf](http://climate2008.igce.ru/v2008/pdf/resume_ob.pdf).
- Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли. 1997. Т. 1. № 1. С. 47–58.
- Скрябин П.Н., Скачков Ю.Б., Варламов С.П. Потепление климата и изменение термического состояния грунтов в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 3. С. 32–40.
- Угаров И.С., Ефремов П.В. Мониторинговые исследования сельскохозяйственных ландшафтов в Центральной Якутии // Успехи современного естествознания. 2011. № 9. С. 23–26.
- Ушаков С.А., Ясманов Н.А. Дрейф материков и климаты Земли. М.: Мысль, 1984. 206 с.
- Чепурнов М.Б. Прогноз изменения геокриологических условий Европейского Севера России и Западной Сибири в связи с возможными изменениями климата: автореф. дис. ... канд. геол.-мин.-наук. М.: Изд-во МГУ, 2000. 20 с.
- Шац М.М. Динамика современного климата и ее роль в оценке территориального потенциала Севера // Территория и планирование. 2010. № 5 (29). URL: <http://terraplan.ru/arhiv/53-5-29-2010/902-605.html>.
- Шестернев Д.М., Еникеев Ф.И., Обязов В.А., Чупрова А.А. Криолитозона Забайкалья в условиях глобального изменения климата: проблемы и приоритетные задачи исследований / Материалы Международного симпозиума «Изменение климата Центральной Азии: социально-экономические и экологические последствия», Чита, 24 октября 2008 г. Чита: Изд-во ЗабГГПУ, 2008. С. 46–52.
- Шполянская Н.А. Попытка прогноза // Знание-Сила. 1990. № 5. С. 54–60.
- Arctic sea ice news and analysis. Summer 2011: Arctic sea ice near record lows / Web-site of the National Snow and Ice Data Center. 2011. URL: <http://nsidc.org/arcticseainews/2011/10/summer-2011-arctic-sea-ice-near-record-lows/>.
- Atmospheric carbon dioxide measure at Alert, Canada, 2008 / Web-site of Environment Canada. 2008. URL: <http://www.ec.gc.ca/scs/default.asp?lang=En&n=0EC06FB9-1>.
- Baliunas S. Uncertainties in climate modeling: solar variability and other factors / Web-site of the George C. Marshall Institute. Climate Change. 09.17.1996. URL: <http://marshall.org/climate-change/uncertainties-in-climate-modeling-solar-variability-and-other-factors/>.
- Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern arctic warming // Journal of Climate. 2010. V. 23 (14). P. 3888–3906.

25. Brown R.J.E. Permafrost and climate change: the IPA report to the IPCC // *Frozen Ground*. 1994. № 15. P. 116–126.
26. Carbon dioxide and terrestrial ecosystems / ed. by G.W. Koch, H.A. Mooney. San Diego: Academic Press, 1996. 443 p.
27. Climate change 1995. The science of climate change: contribution of Working Group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK — New York, USA: IPCC, 1996. 572 p.
28. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Cambridge, UK — New York, USA: Cambridge University Press, 1132 p.
29. Climate Change: the IPCC scientific assessment / ed. by Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J.. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 365 p.
30. Climate Science: investigating climatic and environmental processes. Millennial-scale variability / Web-site of NOAA, 2014. URL: <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/ctl/clisci10k.html>.
31. Copland L., Pope S., Bishop M.P., Shroder J.F., Clendorn P., Bush A., Kamp U., Seong Y.B., Owen L.A. et al. Glacier velocities across the central Karakoram // *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50. P. 41–49.
32. Crowley Th.J. Causes of climate change over the past 1000 years // *Science*. 2000. V. 289. P. 270–277.
33. Emiliani C. Planet Earth: cosmology, geology, and the evolution of life and environment. Cambridge — New York: Cambridge University Press, 1992. 736 p.
34. GISS surface temperature analysis / Web-site of the National Aeronautics and Space Administration, Goddard Institute for Space Studies. 2014. URL: [http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v3/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/).
35. Hansen J., Lebedeff S. Global trends of measured surface air temperature // *Journal of Geophysical Research*. 1987. V. 92. P. 13345–13372.
36. IPCC second assessment. Climate change 1995: a report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 1995. 64 p. URL: <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf>.
37. Jones P.D. Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and update to 1993 // *Journal of Climate*. 1994. V. 7 (11). P. 1794–1802.
38. Keeling C.D., Whorf T.P. Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network / A compendium of data on global change. Oak Ridge, Tennessee, USA: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, 1997.
39. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1997.
40. Macdonald N.J., Sobel J.P. Changing weather? Facts and fallacies about climate change and weather extremes. State College, Pennsylvania, USA: Accu-Weather Inc., 1995. 28 p.
41. Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries // *Nature*, 1998. V. 392. P. 779–787.
42. Nelson F.E., Lachenbruch A.H., Woo M.K., Koster E.A., Osterkamp T.E., Gavrilova M.K., Guodong C. Permafrost and changing climate / Proceedings of the 6-th International Conference on Permafrost. Volume 2. Beijing, China: South China University of Technology Press, 1993. P. 987–1005.
43. News release archive. 2008 News Releases / Web-site of the Earth Observatory, NASA. 2008. URL: <http://www.nasa.gov/audience/for-media/archives/2008-all-archives.html>.
44. Past climates on Earth / Lectures of the University of Michigan. 2014. URL: <http://www.globalchange.umich.edu/globalchange1/current/lectures/kling/paleoclimate/>.
45. Peterson T.C., Easterling D.R., Karl T.R., Groisman P.Ya., Nicholls N., Plummer N., Torok S., Auer I., Boehm R., Gullett D., Vincent L., Heino R., Tuomenvirta H., Mestre O., Szentimre T., Salinger J., Forland E., Hanssen-Bauer I., Alexandersson H., Jones P., Parker D. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review // *International Journal of Climatology*. 1998. V. 18. P. 1493–1517. URL: <http://www.st-andrews.ac.uk/~rjsw/PalaeoPDFs/Peterson-et-al-1998.pdf>.
46. Peterson T.C., Vose R.S. An overview of the Global Historical Climatology Network temperature data base / *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997. V. 78 (12). P. 2837–2849.
47. Reynolds R.W., Smith T.M. Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation // *Journal of Climate*. 1994. V. 7. № 6. P. 929–948.
48. Romanovsky V.E. Thermal state and fate of permafrost in Russia: first results of IPY (plenary paper) / Proceedings of the 9-th International Conference on Permafrost, 29 June – 3 July 2008, Fairbanks, Alaska. V. 2. P. 1511–1518.
49. Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. 2010: Permafrost thermal state in the Polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: a synthesis // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010. V. 21 (2). P. 106–116.
50. Royer D.L., Berner R.A., Montanez I.P., Tabor N.J., Beerling D.J. CO<sub>2</sub> as a primary driver of Phanerozoic climate // *GSA Today*. 2004. V. 14. № 3. P. 4–10.
51. Singer S.F. The scientific case against the global climate treaty: a report. Science and Environmental Policy Project (SEPP), 1997. 38 p.
52. Smith S.L., Throop J., Lewkowicz A.G. Recent changes in climate and permafrost temperatures at forested and polar desert sites in northern Canada // *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2012. V. 49. P. 914–924.
53. Smith T.M., Reynolds R.W., Livezey R.E., Stokes D.C. Reconstruction of historical sea surface temperature using empirical orthogonal functions // *Journal of Climate*. 1996. V. 9 (6). P. 1403–1420.
54. Snow has thinned on Arctic sea ice / Web-site of Technology.org. 2014. URL: <http://www.technology.org/2014/08/14/snow-thinned-arctic-sea-ice/>.
55. Soon W., Baliunas S.L., Robinson A.B., Robinson Z.W. Environmental effects of increased atmospheric carbon dioxide // *Climate research*. 1999. V. 13. P. 149–164. URL: <http://www.int-res.com/articles/cr/13/c013p149.pdf>.
56. Spielhagen R.F., Werner K., Sorensen S.A., Zamelczyk K., Kandiano E., Budeus G., Husum K., Marchitto T.M., Hald M. Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water // *Science*. 2011. V. 331. P. 450–453.
57. Treaties, national sovereignty, and executive power: a report on the Kyoto protocol. May 1998. Alexandria, VA, USA: Committee to Preserve American Security and Sovereignty, 1998. URL: <https://assets.documentcloud.org/documents/1349286/cei00490.pdf>.
58. Zhang T., Osterkamp T. Changing climate and permafrost temperatures in the Alaskan Arctic / Proceedings of the 6-th International Conference on Permafrost. Volume 1. Beijing, China: South China University of Technology Press, 1993. P. 783–788.