= ОБОЗРЕНИЕ ==

Авторы, основываясь на собственных исследованиях и анализируя большой объём данных разного рода измерений и расчётов, рисуют картину изменения ледяного покрова арктических морей и суши, вызванного глобальным потеплением. Сокращение криосферы Земли может привести к негативным последствиям для человечества, в том числе к нарушению привычного уклада жизни людей. Статья подготовлена на основе научного сообщения, представленного на заседании Президиума РАН.

ОЛЕДЕНЕНИЕ В АРКТИКЕ

ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

В.М. Котляков, А.Ф. Глазовский, И.Е. Фролов

Арктика — это страна льда. Лёд на море и ледники на суше (то есть то, что обычно называют общим термином "оледенение") представляют собой главный и специфический элемент полярного ландшафта. В арктическом оледенении, как в фокусе, сосредоточены бесчисленные связи природы этого региона, формирование и развитие которой имеет длительную и сложную историю [1].

Результаты новейших исследований донных отложений Арктического бассейна, а именно, наличие в них материала ледового разноса и диатомового комплекса (Synedropsis spp.), связанного с морскими льдами, показывают, что оледенение Арктики начало формироваться гораздо раньше, чем считалось до сих пор [2]. Так, первое появление сезонных морских льдов в мелких окраинных морях Арктического бассейна сейчас датируется серединой эоцена, то есть около 47.5 млн. лет назад, а в центральных частях бассейна – примерно на 0.5 млн. лет позже. Некоторое количество материала айсбергового разноса, обнаруживаемое в глубоком керне донных отложений, указывает на то, что уже около 46 млн. лет назад в Арктике существовали локальные ледники, достигавшие уровня моря [2]. Ещё недавно появление ледников в Северном полушарии относили к диапазону времени от 2 до 25 млн. лет назад, а сейчас возникновение оледенения Гренландии датируют 38 млн. [3] или даже 44 млн. лет назад [4]. Тем не менее возможность периодических разрастаний ледниковых покровов в Северном полушарии связывают со временем после 23 млн. лет назад, когда уровень содержания CO_2 в атмосфере опустился ниже некоторого порогового значения [5]. Таким образом, буквально в последние годы кардинально изменились представления о возникновении и развитии криосферы Земли в кайнозое.

Получены свидетельства, что оледенение в Арктике возникло прежде, чем в Антарктике, причём морские арктические льды образовались примерно на 24 млн. лет раньше, чем возникла возможность крупных наземных оледенений Северной полярной области. Сейчас наземное и морское оледенения Арктики существуют в тесной взаимосвязи на фоне эпохи глобального потепления. Она началась около 150 лет назад, сменив так называемый "малый ледниковый период", достигший своего максимума в середине XIX в. Рост глобальной температуры воздуха за последние 100 лет составил чуть больше 0.7°C (рис. 1), однако за последние 30 лет этот процесс усилил-

3 ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК том 80 № 3 2010

КОТЛЯКОВ Владимир Михайлович – академик, директор Института географии РАН. ГЛАЗОВСКИЙ Андрей Фёдорович – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института географии РАН. ФРОЛОВ Иван Евгеньевич – доктор географических наук, директор ГНЦ РФ "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт".



Рис. 1. Изменение средней глобальной температуры за 150 лет



ся, особенно резко — над континентальными районами Евразии и Северной Америки и в наибольшей мере — в Арктике.

За тот же период отмечено и повышение уровня Мирового океана. Реконструкции положения этого уровня в конце XIX – начале XX столетия, а затем береговые измерения и, наконец, глобальная спутниковая альтиметрия свидетельствуют о росте уровня Мирового океана на 1.7 мм в год в XX в. В последние десятилетия он продолжал повышаться, и к настоящему времени скорость его роста составляет 3 мм/год. Причины, очевидно, связаны с повышением температуры, которое, с одной стороны, ведёт к расширению теплеющей поверхностной толщи океана, а с другой стороны, само вызывается таянием ледников, что ведёт к увеличению массы воды в океане [6].

Объяснение потеплению ищут в антропогенном воздействии на глобальный климат, прежде всего во влиянии парниковых газов на рост температуры. В последние десятилетия особенно попу-

Рис. 2. Моделирование изменений температуры

a - c учётом только естественных колебаний, $\delta - c$ учётом антропогенных воздействий; толстая кривая — реальный ход температуры, тонкая кривая — результаты моделирования, вертикальный пунктир соответствует времени крупных вулканических извержений

лярным стало создание моделей взаимодействия атмосферы, океана и суши. Такое моделирование учитывает многие факторы, определяющие тепловой режим планеты, и в частности крупные вулканические извержения, которые приводят к краткосрочным понижениям глобальной температуры (рис. 2). Специалисты утверждают, что если в модели учитываются лишь естественные факторы, то результаты расчётов не соответствуют наблюдавшемуся ходу температуры, а если моделирование ведётся с учётом антропогенных воздействий, то данные расчётов вполне близки к наблюдаемому ходу температуры.

МОРСКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ

Температура воздуха в северных широтах изменяется гораздо резче, чем в Северном полушарии в целом. Потепление серьёзным образом влияет на состояние многолетнего ледяного покрова в Северном Ледовитом океане, о чём, например, наглядно свидетельствуют измерения областей максимального и минимального распространения льдов Арктики начиная с 1870 г. [7]. Они показали, что области максимального распространения были относительно устойчивы до начала 1960-х годов, после чего наблюдается их постепенная убыль. В то же время области минимального распространения (характеризующие состояние ледяного покрова на конец лета) более изменчивы в межгодовом и десятилетнем масштабе времени. Тренд к сокращению льдов обнаруживается с начала 1950-х годов, причём процесс явно ускорился в последнее десятилетие (рис. 3) [7].

Ещё недавно тяжёлые льды серьёзно осложняли судоходство по Северному морскому пути, а Северо-Западный проход в Канадском Арктическом архипелаге был практически недоступен для судоходства. В наши дни льды сплочённостью более 7 баллов сохраняются лишь в приполюсном районе и на севере Канадского архипелага. Общая площадь ледяного покрова за последние 20 лет неуклонно сокращается. За последние 10 лет зафиксировано уменьшение площади старых (включая двухлетние) льдов Арктики примерно на 40%. Сравнение оценок толщины морских льдов методом спутниковой лазерной альтиметрии ICESat за 2003-2008 гг. и по данным измерений с подводных лодок в 1958-1976 гг. показывает, что за эти 40 лет льды к концу сезона таяния стали в среднем на 1.6 м (53%) тоньше [8]. По данным спутниковой лазерной альтиметрии, с 2004 г. средняя толщина льдов в октябре уменьшилась на 30% – с 2 до 1.4 м, площадь льдов – на 26% – с 7.3 до 5.4 млн. км², а их объём – на 50% – с 14.6 до 7.56 тыс. км³ [9].

Сезонный ход ледовитости в Северной полярной области мало менялся в течение всех лет наблюдений, но в 2007 и 2008 гг. кромка льда почти





Рис. 3. Изменения год от года площади льдов в Северном Ледовитом океане

Светлые кривые обозначают максимальную ледовитость, тёмные — минимальную, плавные — осреднённый ход максимальной и минимальной ледовитости

во все месяцы занимала наиболее северное положение (рис. 4). Однако если взглянуть на суммарную площадь морских льдов в морях Северного Ледовитого океана, то видны регулярные отклонения сезонного хода от линейных трендов. При этом в западном секторе Арктики, где сильно влияние Гольфстрима, эти колебания носят более резкий характер по сравнению с восточным сектором. В районе моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей изменения происходят гораздо более плавно. Соответственно в этих секторах различаются и линейные тренды: довольно резкое уменьшение площади льда характерно для Гренландского, Баренцева и Карского морей, в то время как в восточных морях эта тенденция очень слабая (рис. 5).

Если сравнить состояние льдов Северного Ледовитого океана в первую и вторую половину



Рис. 4. Сезонный ход ледовитости Северной полярной области в 1978–2008 гг.

№ 3 2010

3*





a – все моря, δ – западные моря: Гренландское, Баренцево, Карское, s – восточные моря: Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское

ХХ столетия, то в обоих секторах можно увидеть существенные различия. В первой половине века площадь морских льдов в западных морях уменьшалась довольно быстро, а в восточных, наоборот, даже несколько возрастала, тогда как во второй половине столетия для обеих частей Северного Ледовитого океана характерна одинаковая тенденция — сокращение площади льда, в западных морях намного более медленное, чем в начале века (рис. 6).

Итак, климатические изменения ледяного покрова арктических морей в XX в. имели отрицательный линейный тренд, и на этом фоне происходили циклические колебания продолжительностью около 60, 20 и 10 лет. В ходе изменения температуры обнаружен сверхвековой цикл длительностью около 200 лет, создающий тренд изме-



Рис. 6. Линейные тренды суммарной площади льда в августе в западных (a, δ) и восточных (e, e) арктических морях

нений климата. Характерны снижение трендов и амплитуд циклов с удалением от Арктики и их возрастание над континентами.



Рис. 7. Изменения аномалии среднегодовой температуры воздуха в широтной зоне $70-85^{\circ}$ с.ш. в XX – начале XXI в. и её фоновый прогноз (*a*), а также предполагаемые изменения ледовитости арктических морей западного (*б*) и восточного (*в*) регионов в XXI в.

На рис. б и в прямая линия показывает общий тренд температуры, пунктир – её более детальный предполагаемый ход

Основные черты климатических изменений связаны с колебаниями общей циркуляции атмосферы, которые зависят от состояния полярного вихря. В эпохи потепления полярный вихрь углубляется, что ведёт к ослаблению арктического антициклона и усилению зонального потока в атмосфере умеренных широт. В эпохи похолодания отмечаются противоположные изменения. Эти особенности циркуляции атмосферы объясняются вариациями солнечной активности и "диссимметрией Солнца", которая может изменяться с периодом около 60 лет в пределах 2.5% и оказывать большее влияние в высокоширотных областях, а также автоколебаниями в системе "атмосфера-лёд-океан" и влиянием аэрозолей и парниковых газов антропогенного происхождения. Но решающая роль принадлежит всё-таки естественным причинам.

Прогнозы температуры воздуха и ледовитости арктических морей на XXI в. указывают на колебательный характер их изменений. Если основываться на имеющихся гидрометеорологических и ледовых данных и наличии 60-летней составляющей в вековом ходе температуры, можно составить следующий фоновый прогноз ледовитости в Северном Ледовитом океане: в западных морях изменения ледовитости будут, конечно, более резкими, чем в восточных (рис. 7). Важными факторами резких изменений ледовитости, кроме температуры воздуха, служат сама толщина льда, характер поступления тёплых вод в Арктику, положительные обратные связи с альбедо поверхности.

НАЗЕМНОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ

Посмотрим теперь, что происходит с арктическими ледниками. В настоящее время ледники и ледниковые купола на высокоширотных арктических архипелагах занимают площадь почти 250 тыс. км², в том числе более 150 тыс. км² в Канадском Арктическом архипелаге, свыше 36 тыс. км² на Шпицбергене и более 55 тыс. км² на трёх архипелагах, принадлежащих России. Однако основные массы льда находятся в Гренландии, где Грен-

ландский ледниковый покров занимает площадь более 1.7 млн. км² и отдельные ледники и ледниковые купола — ещё около 50 тыс. км². Так что в целом в Арктике находятся огромные массы льда на территории более 2 млн. км². В эпоху потепления, естественно, ледники тают, что приводит к подъёму уровня Мирового океана.

Канадская Арктика. За вторую половину ХХ столетия оледенение Канадского Арктического архипелага в целом сократилось примерно на 3%, причём быстрее всего утончались самые низкие участки ледников, а наиболее высокие местами даже утолщались. Быстрее всего убывают ледниковые купола в южной части архипелага, медленнее всего – в северной. Некоторые низкие ледниковые купола на Земле Элсмира с 1960-х годов потеряли от 30 до 45% площади. Площадь ледниковых куполов на севере Баффиновой Земли с 1958 г. уменьшилась более чем на 50%. Такого сокращения эти купола не испытывали по меньшей мере за последние 1600 лет [10]. Общие потери льда ледниками Канадской Арктики за 1995-2000 гг. составляли 25.16 км³/год, а за исключением ледников Баффиновой Земли – 14 км³/год, что близко к оценкам, сделанным для периода 1959-1999 гг., — 15.5 км³/год.

Особенно сильному разрушению подверглись шельфовые ледники Канадского Арктического архипелага. Они возникли здесь около 5500 лет назад и с тех пор не исчезали, но в течение XX в. сократились на 90% (с 9000 до 1040 км²) [11]. В начале нынешнего столетия разрушение продолжилось — раскололся надвое ледник Уорд-Хант на Земле Элсмира, и в этом же районе от шельфового ледника откололся айсберг площадью в 60 км². Летом 2008 г. площадь шельфовых ледников Канадского архипелага уменьшилась ещё на 200 км², то есть почти на четверть. Наблюдения показали [11], что активное разрушение шельфовых ледников наступало, когда число дней с положительной температурой превышало 200 в год.

Гренландия. Особое место в наземном оледенении Арктики занимает Гренландский ледниковый покров. Его объём составляет 2.93 млн. км³ льда, что эквивалентно изменению уровня Мирового океана примерно на 7.5 м. По оценкам [12], в течение 1984-2004 гг. на поверхность Гренландского ледникового покрова площадью 1.71 млн. км² ежегодно поступало в среднем 641 км³ осадков, из них 24 км³ – в жидком виде. Из-за испарения и сублимации с поверхности теряется около 64 км³ и ещё примерно 34 км³ – при испарении в метелевом переносе. В результате таяния образуется около 494 км³ воды, часть её повторно замерзает, но заметная доля (373 км³) уходит с жидким стоком. В результате поверхностный баланс покрова положителен и составляет около 170 км³. Есть и другие оценки баланса массы ледникового покрова. Например, для периода 1958–2007 гг. поверхностный баланс равнялся 285 Гт/год, в 1960-х – начале 1970-х годов был на 15–20% ниже этой средней величины, а с начала 90-х годов, в связи с усилением жидкого стока, он постоянно сокращался и опустился на 35% ниже среднего значения.

Важным элементом общего баланса массы ледникового покрова служит сток льда в море, который происходит главным образом за счёт быстро движущихся выводных ледников. Они поставляют большое количество айсбергов, а некоторые ледники, выдвигаясь далеко во фьорды, образуют плавучие плиты, которые испытывают интенсивное таяние снизу. По оценкам [13], потери ледника Петерманна на 80% связаны с таянием подошвы плавучей части и только на 20% — с отколом айсбергов.

Существует целая серия оценок общего баланса Гренландского ледникового покрова, построенных на дистанционных данных - спутниковой радарной альтиметрии, воздушной лазерной альтиметрии и спутниковой гравиметрии. Измерения высоты ледниковой поверхности, выполненные в 1992-2003 гг. по данным спутниковой радарной альтиметрии [14], показали, что на высотах больше 1500 м поверхность ледникового покрова повышается со скоростью 6.4 ± 0.2 см/год, а ниже 1500 м – понижается со скоростью 2.0 ± ± 0.9 см/год. В целом поверхность Гренландского ледникового покрова повышается на 5.4 ± 0.2 см в год. Другие оценки по таким же данным за 1992-2002 гг. [15] рисуют сходную картину: выше границы питания отмечен прирост объёма льда на 53 ± 2 км³/год, а ниже — потеря объёма на 42 ± ± 2 км³/год. Таким образом, объём ледникового покрова увеличивается на $11.1 \pm 3 \text{ км}^3$ /год, что эквивалентно падению уровня Мирового океана на 0.03 мм/год.

Существенно иные оценки получены на основании воздушной лазерной альтиметрии [16]. По этим данным, снижение объёма льда за 1993/94–1998/99 гг. составило около 60 км³/год, а за 1997–2003 гг. – 80.0 ± 12 км³/год. Сходные результаты дала обработка гравиметрических данных спутников GRACE за период с лета 2002 г. до лета 2004 г. [17]: чистые потери – 82 ± 28 км³ воды в год, что равнозначно поднятию на 0.23 ± 0.06 мм/год уровня Мирового океана.

Данные спутниковой гравиметрии с июля 2002 г. по март 2005 г. [18] свидетельствуют о ещё больших потерях — 129 \pm 15 км³ воды в год, что соответствует поднятию уровня Мирового океана на 0.36 \pm 0.04 мм/год. Оценки для Гренландии по данным спутниковой гравиметрии за период с апреля 2002 г. по ноябрь 2005 г. [19] показывают потери до 239 \pm 23 км³/год (соответственно, повы-

шение уровня океана на 0.67 ± 0.05 мм/год). А самые последние гравиметрические оценки с апреля 2002 г. по апрель 2006 г. [20] таковы: ледяной покров тает на $248 \pm 36 \text{ км}^3$ /год (2/3 приходится на Южную Гренландию и 1/3 на Северную), причём если с апреля 2002 г. до апреля 2004 г. потери составляли 104 ± 54 км³/год, то с мая 2004 г. до апреля 2006 г. -342 ± 66 км³/год. Такое ускорение таяния связано главным образом с южной частью покрова, где с апреля 2002 г. до апреля 2004 г. величина потерь — $20 \pm 26 \text{ км}^3$ /год, а с мая 2004 г. до апреля 2006 г. – 246 ± 36 км³/год. Для сравнения: в северной части Гренландского ледникового покрова такие показатели в те же периоды отличались мало: $80 \pm 28 \text{ км}^3$ /год и $90 \pm 28 \text{ км}^3$ /год соответственно.

Данные GRACE для 2003–2005 гг., обработанные несколько иным способом, а именно по шести дренажным системам Гренландского ледникового покрова, показали, что скорость потерь льда составляла за этот период 101 \pm 16 км³/год, причём выше 2000 м объём льда увеличивался на 54 км³/год, а ниже — убывал на 155 км³/год [21]. В этом же исследовании утверждается, что в 1990-х годах общий баланс ледникового покрова был близок к нулю, но позже стал глубоко отрицательным (-113 \pm 17 км³/год).

Несмотря на большой диапазон погрешностей в гравиметрических оценках, столь существенное увеличение отрицательного общего баланса Гренландского покрова с высокой степенью вероятно, особенно если учесть дополнительные независимые свидетельства, которые одновременно объясняют причины таких значительных потерь на фоне относительно устойчивого положительного поверхностного баланса массы.

Последние данные об изменениях льдов Гренландии (с февраля 2003 г. по апрель 2007 г.) опираются на результаты обработки спутниковой лазерной альтиметрии ICESat [22]. Согласно этим оценкам, средние потери объёма льда Гренландии за указанный период равны 147 ± 1 км³/год, причём ниже 2000 м убыль составила 168 км³/год, а выше 2000 м отмечен прирост в 21 км³/год.

По данным анализа спутниковой радарной интерферометрии, в 1996—2000 гг. выявлено ускорение движения выводных ледников Гренландии южнее 66° с.ш., которое в 2001—2005 гг. распространилось на север до 70° с.ш. [23]. Ускорение движения ледников на западном и особенно восточном побережьях Гренландии привело к тому, что сток льда в море за последнее десятилетие вырос с 90 до 220 км³/год, то есть почти на 250% — величину, практически совпадающую с ростом общих потерь льда в этом районе. Таким образом, вполне можно предполагать, что главной причиной существенно негативного баланса Гренланд-

ского ледникового покрова стало не столько уменьшение осадков или рост жидкого стока, сколько ускорение сброса льда в океан выводными ледниками.

Дополнительное свидетельство активизации выводных ледников предоставили наблюдения за сейсмичностью Гренландии, а именно за числом так называемых льдотрясений - сейсмических событий, происходящих в теле или на подошве ледников [24]. Для таких ледниковых землетрясений характерен, в частности, чётко выраженный сезонный ход с максимумом событий в августе и минимумом в феврале, тогда как у обычных землетрясений сезонный цикл не обнаруживается. Кроме того, льдотрясения отличаются от обычных сейсмических событий спектром колебаний, который не воспроизводится в моделях разрядки тектонических напряжений в земной коре, но успешно описывается процессами крупных и быстрых (30-60 с) подвижек ледника по ложу. С января 1993 г. по октябрь 2005 г. в Южной Гренландии, по данным глобальной сети сейсмостанций, выявлено 183 землетрясения, не вошедшие в стандартные каталоги. Из них 136 относятся к разряду льдотрясений с магнитудами от 4.6 до 5.1. Все эти события приурочены к устьевым областям крупных выводных ледников, и, что самое важное, после 2002 г. по сравнению с предшествующим периодом (1993-2002) их ежегодное число удвоилось.

Итак, появляется всё больше свидетельств того, что в последние годы в Гренландском ледниковом покрове на фоне некоторого уменьшения поверхностного баланса массы существенно повысилась неустойчивость выводных ледников и удвоились динамические потери льда за счёт его сброса в океан. Именно эти процессы и контролируют в настоящий момент общий баланс покрова. Ускорение движения выводных ледников может быть косвенно связано и с климатическими причинами, например с усилением поверхностного таяния и поступлением дополнительной воды в тело ледников и на их ложе, что способствует деформации и скольжению льда. Вторая возможная причина – потепление воды во фьордах, благодаря чему усиливается таяние подводной части ледников на линии налегания и в конечном счёте приводит к динамической неустойчивости.

Самые последние сведения о скоростях движения 32 выводных ледников юго-восточной части Гренландии, то есть в районе самых больших потерь льда, подводят к заключению [25] о том, что на фоне сезонной изменчивости практически все ледники отступают, утончаются и ускоряются, причём ускорение пропорционально темпам отступания. Очевидно, увеличение скоростей движения происходит вследствие уменьшения силы сопротивления на фронте ледника во время от-

ступания. Во многих случаях отступание начиналось с увеличения темпов утончения вблизи фронта летом 2003-го — года аномально высоких температур воздуха на побережье и температуры поверхностных вод. В качестве причин ускорения движения называют появление тёплых морских вод в устьях выводных ледников [26].

Вместе с тем на примере выводных ледников Аляски, заканчивающихся в море, видно, что их колебания определяются главным образом батиметрией прилегающей акватории, формой ледникового ложа и долины. Поэтому наблюдавшиеся в прошлом и фиксируемые сейчас катастрофические отступания и даже разрушения некоторых из них происходят независимо от климатических событий, хотя могут быть следствием незначительного климатического толчка. Таким толчком может служить усиление поверхностного таяния и вследствие этого увеличение поступления талых вод на ложе выводных ледников. Подобное усиление таяния обнаруживается по космическим изображениям начиная с 1979 г.: кумулятивные площади таяния на поверхности Гренландского ледникового покрова с тех пор возросли на 54%. Площадь, на которой происходит таяние хотя бы раз в году, с 1992 г. увеличивается со скоростью 40924 км²/год, то есть этому подвергается почти 2.3% общей площади Гренландского ледникового покрова [27].

Шпицберген. Площадь оледенения Шпицбергена – 36 600 км², объём льда в ледниках – почти 7000 км³, что эквивалентно 0.02 м уровня Мирового океана. Годовая поверхностная аккумуляция и годовое поверхностное таяние примерно равны – около 25 ± 5 км³/год каждый, но поверхностный баланс массы всех ледников за последние 30 лет оценивается как слабо отрицательный: -0.5 ± 1 км³/год (-14 ± 3 мм/год). Поскольку с айсберговым стоком теряется ещё 4 ± 1 км³/год (из них около 1 км³/год связано с отступанием фронтов ледников, заканчивающихся в море), то общий баланс оледенения равен -4.5 ± 1 км³/год (-120 ± 30 мм/год) [28].

Данные воздушной лазерной альтиметрии по семи ледниковым комплексам Шпицбергена показали, что в 1996—2002 гг. они в среднем утончались на 0.19 м/год — в 1.6 раза быстрее, чем по приведённым выше балансовым оценкам. Наибольшие потери обнаружены на ледниках южного Шпицбергена (0.5 м/год), на севере ледники более устойчивы [29].

Вывод об ускорении потерь массы ледниками Шпицбергена подкрепляется геодезическими измерениями [30], которые показывают, что убыль ледников на западе архипелага ускоряется. Спутниковые гравиметрические измерения также подтверждают, что масса льда на Шпицбергене и в северо-западной Гренландии уменьшается в бо́льших масштабах, чем предполагалось ранее [19]. Возможно, это следствие ускорения убыли ледников Шпицбергена.

На Шпицбергене не менее 132 ледников, занимающих около 50% всей площади оледенения, относятся к пульсирующему типу [31]. Согласно результатам полевых работ, выполнявшихся нами на одном из пульсирующих ледников Шпицбергена — леднике Фритьоф, его внутреннее гидротермическое состояние до и после подвижки существенно изменилось, и это может быть как следствием, так и отчасти причиной его динамической неустойчивости.

Российская Арктика. Характерно, что далее на восток в Российской Арктике пульсирующих ледников мало: на Новой Земле менее 10, на Северной Земле три, а на Земле Франца-Иосифа их нет совсем. Такие различия, очевидно, определяются разницей термического режима ледников и ослаблением "энергии оледенения", то есть вертикального градиента баланса массы, с запада на восток. Тем не менее, если потепление в Арктике продолжится, может произойти перестройка гидротермической структуры ледников, и энергия оледенения усилится в связи с ростом таяния и увеличением осадков, поэтому не исключён рост неустойчивости ледников Российской Арктики и их переход в пульсирующий режим.

Над архипелагами Российской Арктики также проведено спутниковое лазерное зондирование. Детальные профили лазерной альтиметрии имеются и для Земли Франца-Иосифа, и для Новой Земли. Наши наблюдения свидетельствуют об уменьшении толщины выводных ледников Новой Земли. За вторую половину ХХ в., со времени Международного геофизического года, когда мы вели здесь детальные исследования, ледники стали на 30-100 м тоньше. Если это полустолетие поделить на три периода (табл. 1), то оказывается, что в 70-е и 80-е годы ледники отступали медленнее, чем в предыдущие 50-е и 60-е [32], последующие 90-е годы и в наше время. Это вполне соответствует глобальному ходу температуры, отличающемуся похолоданием 60-70-х годов.

Анализ космических материалов и сравнение с имеющимися картами показали, что площадь ледников Российской Арктики за последние 50 лет (табл. 2) сократилась как минимум на 725 км², в том числе на Земле Франца-Иосифа – на 375 км², на Новой Земле – на 284 км² и на Северной Земле – на 65 км². Это равно убыли всей площади оледенения на 1.3% [33]. Наблюдения [34] и балансовые оценки, сделанные для ледников Земли Франца-Иосифа, демонстрируют, что удельные потери ледников за полвека составили около 10 м в слое воды.

Арктика в целом. Из анализа данных по балансу массы ледников Российской и Канадской Арк-

ОЛЕДЕНЕНИЕ В АРКТИКЕ

Период	1952–1973	1973–1988	1988–2001
Изменение площади ледников, км ²	-133	-67	-84.2
Изменение объёма ледников, км ³	-70.4	-35.4	-44.5
Скорость изменения площади, км ² /год	-6.3	-4.5	-6.5
Скорость изменения объёма, км ³ /год	-3.4	-2.4	-3.4

Таблица 1. Изменение оледенение на островах Российской Арктики за 1952-2001 гг.

Таблица 2. Изменение оледенения на арктических архипелагах за 1952–2001 гг.

Архипелаг Показатель	Земля Франца- Иосифа	Северная Земля	Новая Земля	Всего
Площадь ледников в 1952 г., км ²	13735	18326	20136	52197
Изменение площади ледников за 1952—2001 гг., κm^2	-375	-65	-284	-725
Объём льда в 1952 г., км ³ льда	2144	5406	8243	15793
Изменение объёма льда за 1952–2001 гг., км ³ льда	-71	-24	-150	-246
Доля айсберговых потерь, %	53	27	19	29

тики, Северной Америки, Шпицбергена, Скандинавии и ледникового покрова Гренландии следует, что наблюдаемая сейчас убыль льда существенно зависит не только от поверхностного баланса массы ледников (климатическая составляющая), но и от интенсивности стока льда в море (динамическая составляющая).

С 1961 по 2005 г. средняя скорость уменьшения объёма льда в ледниках Арктики составляла 66.1 км³/год, что эквивалентно повышению уровня Мирового океана на 0.18 мм/год. Чистые потери льда Арктики (без учёта Гренландского покрова) на 70% связаны с поверхностной убылью массы (климатические потери), а на 30% — со стоком льда в морские бассейны (динамические потери). Механизм динамических потерь существенно усиливает чувствительность арктических ледников к климатическим изменениям.

В результате комплексных оценок обнаружено [6], что в конце XX и начале XXI в. в Арктике усилились динамические потери массы льда (расхода льда в море через линию налегания). В 2000–2005 гг. общее сокращение панарктических ледников и Гренландского ледникового покрова способствовало изменению уровня моря в расчёте на площадь Северного Ледовитого океана примерно на 20 мм/год (или 0.7 мм/год – на площадь Мирового океана), то есть около 20–25% от наблюдаемого глобального повышения уровня.

Таким образом, в целом баланс массы наземного оледенения Арктики сейчас отрицателен. Трудно сказать окончательно, насколько типичны и, главное, долговременны обнаруженные изменения баланса массы полярных ледниковых покровов, поскольку инструментальные наблюдения за ними проводятся всего несколько лет. Однако появляется всё больше свидетельств того, что ледниковые покровы динамически гораздо более изменчивы, чем это считалось ранее.

Сейчас всё больше экспертных оценок сволится к тому, что человечество ожидают серьёзные проблемы, связанные именно с глобальным потеплением. Между тем весь современный уклад жизни людей на Земле (инфраструктура, экономика, сельское хозяйство и т.п.) таков, что любые климатические изменения (глобальные или региональные потепления, похолодания, увлажнения, иссушения и т.п.) могут быть для него неблагоприятны, поскольку этот уклад столь бурно развился и сложился в короткий промежуток времени, практически за последнее столетие, и потому приспособлен только к весьма узким климатическим и географическим рамкам. Любой сдвиг этих рамок способен вызвать самые неожиданные, в том числе негативные, последствия.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Past Climate Variability and Change in the Arctic and at High Latitude. A report by the U.S. Climate Change Program and Subcommittee on Global Change Research / Alley R.B., Brigham-Grette J., Miller G.H., Polyak L., White J.W.C. (coordinating lead authors). U.S. Geological Survey. Reston, 2009. VA.
- Stickley C.E., St John K., Nalân Koç et al. Evidence for middle Eocene Arctic sea ice from diatoms and icerafted debris // Nature. 2009. V. 460. P. 376–379.
- Eldrett J.S., Harding I.C., Wilson P.A et al. Continental ice in Greenland during the Eocene and Oligocene // Nature. 2007. V. 466. P. 176–179.

2010

- 4. *Tripati A., Eagle R.A., Morton A. et al.* Evidence for glaciation in the Northern Hemisphere back to 44Ma from ice-rafted debris in the Greenland Sea // Earth Planetary Science Letters. 2008. V. 265. P. 112–122.
- DeConto R.M., Pollard D, Wilson P.A. et al. Thresholds for Cenozoic bipolar glaciation // Nature. 2008. V. 455. P. 652–656.
- Meier M.F., Dyurgerov M.B., Rick U.K. et al. Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century // Science. 2007. V. 317. P. 1064–1067.
- Kinnard C., Zdanowicz C.M., Koerner R.M., Fisher D.A. A changing Arctic seasonal ice zone: Observations from 1870–2003 and possible oceanographic consequences // Geophys. Research Letters. 2008. V. 35. L02507, doi: 10.1029/2007GL032507.
- Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958– 2008 // Geophys. Research Letters. 2009. V. 36. L15501, doi: 1029/2009GL039035.
- Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M. et al. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008 // Journ. of Geophys. Research. 2009. V. 114. C07005, doi: 10.1029/2009JC005312.
- Anderson R.K., Miller G.H., Briner J.P. et al. A millennial perspective on Arctic warming from ¹⁴C in quartz and plants emerging from beneath ice caps // Geophys. Research Letters. 2008. V. 35. L01502, doi: 10/1029/2007GL032057.
- Copland L., Mueller D.R., Weir L. Rapid loss of the Ayles Ice Shelf, Ellesmere Island, Canada // Geophys. Research Letters. 2007. V. 34, L21501, doi:10.1029/2007GL031809.
- Box J.E., Bromwich D.H., Veenhuis B.A et al. Greenland Ice Sheet surface mass balance variability (1988–2004) from calibrated Polar MM5 Output // Journ. of Climate. 2006. V. 19. P. 2783–2800.
- Rignot E., Steffen K. Channelized bottom melting and stability of floating ice shelves // Geophys. Research Letters, 2008. V. 35, L02503, doi:10.1029/2007GL031765.
- Johannessen O.M., Khvorostovsky K., Miles M.W., Bobylev L.P. Recent ice-sheet growth in the interior of Greenland // Science. 2005. V. 310. P. 1013–1015.
- 15. Zwally H.J., Giovinetto M.B., Jun Li et al. Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992–2002 // Journ. of Glaciology. 2005. V. 51. № 175. P. 509–527.
- Krabill W., Hanna E., Huybrechts P. et al. Greenland ice sheet: increased coastal thinning // Geophys. Research Letters. 2004. V. 31. N24. L24402, doi:10.1029/2004GL021533.
- Velicogna I., Wahr J. Greenland mass balance from GRACE // Geophys. Research Letters. 2005. V. 32. L18505, doi:10.1029/2005GL023955.
- 18. *Ramillien G., Lombard A., Cazenave A. et al.* Interannual variations of the mass balance of the Antarctica and Greenland ice sheets from GRACE // Global and Planetary Change. 2006. V. 53. P. 198–208.
- Chen J.L., Wilson C.R., Tapley B.D. Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland Ice Sheet // Science. doi: 10.1126/science.1129007, Published Online (Science Express), August 10, 2006.

- Velicogna I., Wahr J. Acceleration of Greenland ice mass loss in spring 2004 // Nature. 2006. V. 443. P. 329– 331. doi:10.1038/nature05168,
- 21. Luthcke S.B., Zwally H.J., Abdalati W. et al. Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations // Science. doi: 10.1126/science.113077619. Published Online (Science Express), October, 2006.
- 22. *Slobbe D.C., Lindenbergh R.C., Ditmar P.* Estimation of volume change rates of Greenland's ice sheet from ICESat data using overlapping footprints // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. P. 4204–4213.
- Rignot E., Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet // Science. 2006. V. 311. P. 986–990.
- Ekström G., Nettles M., Tsai V.C. Seasonality and increasing frequency of Greenland glacial earthquakes // Science. 2006. V. 311. P. 1756–1758, 1789.
- Howat I.M., Joughin I., Fahnesock M. et al. Synchronous retreat and acceleration of southeast Greenland outlet glaciers 2000–06: ice dynamics and coupling to climate // Journ. of Glaciology. 2008. V. 54. P. 646–660.
- Holland D.M., Thomas R.H., Brad de Young et al. Acceleration of Jakobshavn Isbr? triggered by warm subsurface ocean waters // Nature Geoscience. 2008. P. 659–664.
- Tedesco M. Snowmelt detection over the Greenland ice sheet from SSM/I brightness temperature daily variations // Geophys. Research Letters. 2007. V. 34. L02504, doi:10.1029/2006GL028466.
- Hagen J.O., Melvold K., Pinglot F., Dowdeswell J.A. On the net mass balance of the glaciers and ice caps in Svalbard, Norwegian Arctic // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2003. V. 35. P. 264–270.
- 29. *Bamber J.L., Krabill W., Raper V. et al.* Elevation changes measured on Svalbard glaciers and ice caps from airborne laser data // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. P. 202–208.
- Kohler J., James T.D., Murray T. et al. Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers // Geophys. Research Letters. 2007. V. 34, L18502, doi:10.1029/2007GL030681.
- Hagen J.O., Liestøl O., Roland E., Jørgensen T. Glacier Atlas of Svalbard and Jan Mayen. Norsk Polarinstitutt Meddelelser. 1993. № 129; Jiskoot H., Murray T., Boyle P. Controls on the distribution of surge-type glaciers in Svalbard // Journ. of Glaciology. 2000. V. 46. P. 412–422.
- Каталог ледников СССР. Т. 3. Северный край. Ч. 1. Земля Франца-Иосифа. Бассейн Баренцева моря. М.: Гидрометеоиздат, 1965.
- Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ред. В.М. Котляков. М.: Наука, 2006. С. 97–114.
- Dowdeswell J.A., Gorman M.R., Glazovsky A.F., Macheret Yu. Ya. Airborne radio-echo sounding of the icecaps on Franz Josef Land in 1994 // Материалы гляциологических исследований. М., 1996. Вып. 80. С. 248–255.

