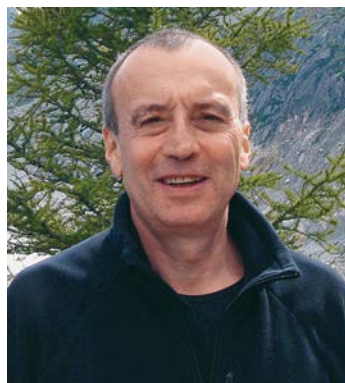
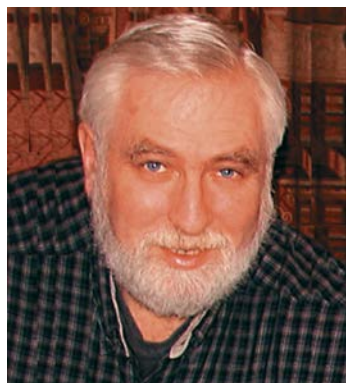


## Динамика ледникового покрова Антарктиды в эпоху потепления

В.М. КОТЛЯКОВ,  
академик  
А.Ф. ГЛАЗОВСКИЙ,  
кандидат географических наук  
М.Ю. МОСКАЛЕВСКИЙ,  
кандидат географических наук  
Институт географии РАН

---



В статье рассматривается современный режим Антарктического ледникового покрова и история становления взглядов на состояние баланса массы льда

в Антарктиде. Современные методы исследований подтверждают давние заключения о том, что масса льда в Восточной Антарктиде в эпоху глобального

потепления возрастает, тогда как Западно-Антарктический ледниковый покров и ледники на Антарктическом полуострове продолжают отступать.

### ОТКРЫТИЕ АНТАРКТИДЫ

В 2020 г. во всем мире, и прежде всего в России, будет отмечаться 200-летие открытия Антарктиды. Русская

кругосветная экспедиция под руководством Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева впервые увидела берег Антарктического материка

28 января 1820 г. (Земля и Вселенная, 1987, № 5). Корабли “Мирный” и “Восток” находились в море Лазарева в точке с координатами 69° 21' ю.ш.

и 2 °15' в.д., когда моряки увидели большие буристые ледяные поля, отличавшиеся от всех виденных до сих пор. В дневнике морского офицера П.М. Новосильского в эти дни появилась характерная запись: "5 февраля при сильном ветре тишина моря была необыкновенная. Множество полярных птиц и снежных петрелей вьется над шлюпом. Это значит, что около нас должен быть берег или неподвижные льды... мы устремились сквозь льды к ледяному берегу".

Это важнейшее географическое событие, последовавшее спустя полвека после



Руководители русской кругосветной экспедиции 1819–1822 гг. Ф.Ф. Беллинсгаузен и М.П. Лазарев, открывшие 16 (27) января 1820 г. Антарктиду.

заявления знаменитого английского мореплавателя Джеймса Кука о том, что люди никогда не смогут пробиться

на юг дальше тех широт, которых он достиг; они не смогут увидеть неизвестный гипотетический материк, о котором



Встреча шлюпов "Восток" и "Мирный" около берегов Антарктиды. Картина художника В.В. Волкова.



*Айсберг у антарктических берегов. 2009 г. Фото В.М. Котлякова.*

Дж. Росс), 1900–1910-е гг. (О. Норденшельд, К. Ларсен, Э. фон Дригальский, Э. Шеклтон, Р. Скотт, Р. Амундсен, Н. Ширазе, В. Фильхнер, Д. Моусон) и 1930-е гг. (Д. Моусон, Р. Бёрд, Л. Элсуэрт). В 1950-е гг. начались широкие исследования в Антарктике, чему способствовал Международный геофизический год (1957–1958 гг.; Земля и Вселенная, 2007, № 4); именно в этот период к планомерным работам приступил Советский Союз.

Обширные наблюдения во время Международного геофизического года показали увеличение выпадающих осадков и рост температуры на субантарктических островах, а на станции Литл-Америка среднегодовая температура с 1911 г. по 1957 г. возросла на 3 °С (с –27,2 °С до –24,2 °С). Как известно, рост температуры воздуха приводит к усилению циркуляции атмосферы, росту содержания водяных паров и соответственно к возрастанию выпадающих осадков. Усиливается меридиональный обмен воздушных масс, и на Антарктический материк поступает более теплый и влажный воздух. Повышение температуры

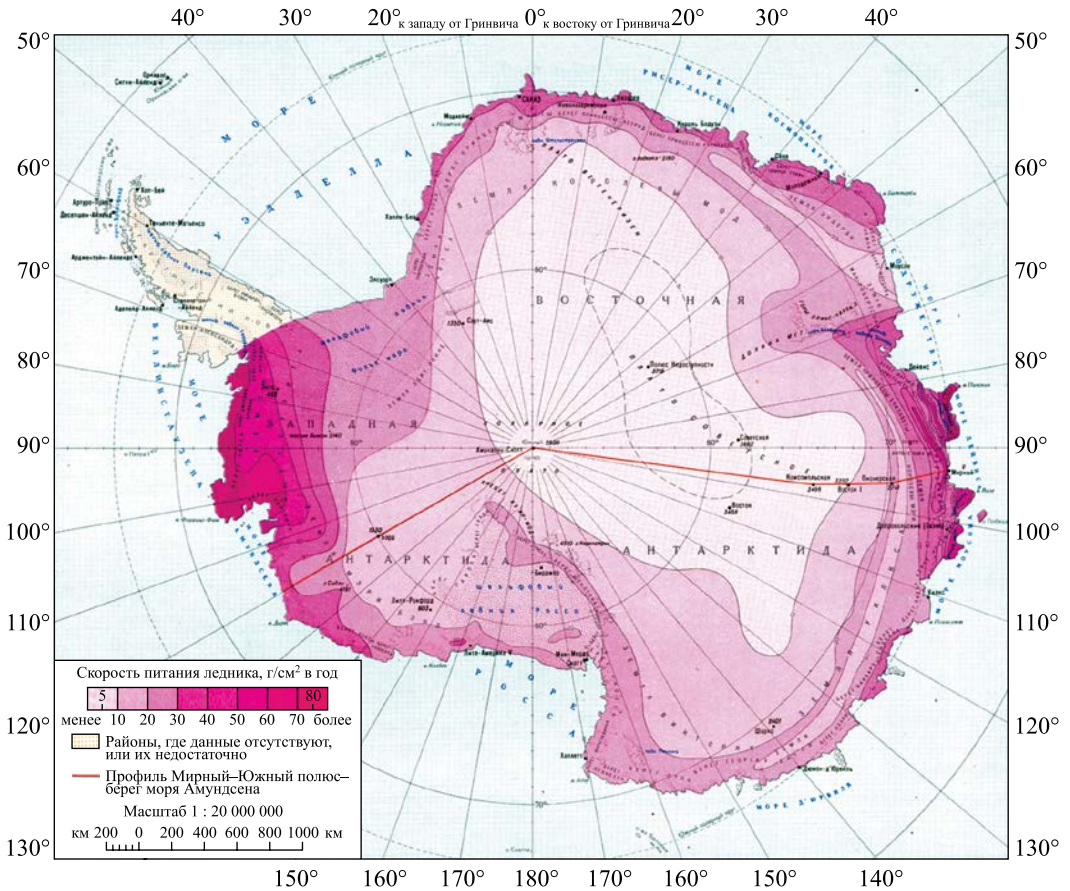
говорили уже в XVII и XVIII вв. В 1960–1970-х гг. в популярной географической литературе неоднократно упоминалась карта Пири Рейса, составленная в начале XVII в. На ней можно увидеть “кусочек” южного материка. Подобные контуры тогда рисовали, исходя из ложного предположения о необходимости “уравновешивания” планеты равномерным распределением суши: на севере планеты лежат в основном материки, а на юге находится только океан.

Экспедиция Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева прошла южнее полярного круга и дала первые сведения о льдах Антарктики. На основании изучения свойств и строения

неподвижных и плавающих льдов Ф.Ф. Беллинсгаузен составил первое описание и выполнил классификацию антарктических льдов. Так началось изучение новых земель в южно-полярной области Земли, продолженное в последующие 130 лет усилиями многих исследователей из ряда стран.

#### РОСТ МАССЫ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА

Если внимательно посмотреть на годы активной антарктической деятельности, то можно отметить несколько периодов географических открытий в этой части земного шара: 1830–1940-е гг. (Ж. Дюмон-д'Юрвиль, Ч. Уилкс,



Карта Антарктического материка со средними годовыми температурами, измеренными на глубине 10–15 м в толще ледникового покрова. Карта из Атласа Антарктики (М.: 1966, Т. 1) составлена В.М. Котляковым.

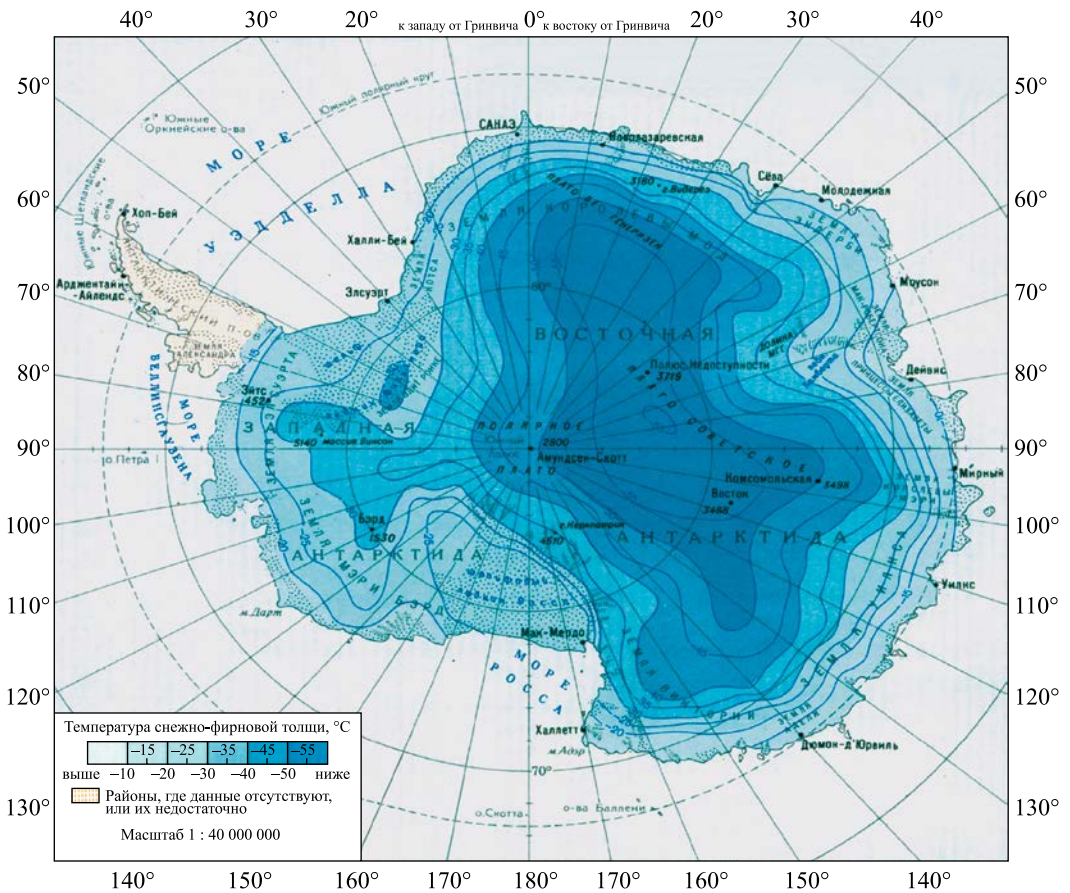
даже на несколько градусов не вызывает таяния снега внутри материка, так как морозы здесь господствуют и летом, а вот увеличение влаги приводит к более обильным снегопадам. Глобальное потепление усиливает атмосферную циркуляцию в Антарктике и ведет к росту ледникового покрова.

Уже в конце 1950-х гг., несмотря на отрывочные сведения об аккумуля-

ляции снега на поверхности ледникового покрова и убывании льда в результате откола айсбергов от его краевой части, стало складываться мнение о превышении аккумуляции снега на Антарктическом ледниковом щите над его расходом. В 1960-х гг. один из авторов этой статьи (В.М. Котляков) составил первые карты температурного режима и аккумуляции снега

на всей площади Антарктического ледника, они опубликованы в первом Атласе Антарктики, изданном в 1966 г.

Можно предположить, что с ростом глобальной температуры и увеличением аккумуляции снега на поверхности ледникового покрова растёт и скорость движения льда в сторону моря. Однако это происходит со значительным запаздыванием; в итоге можно



Карта с указанием годового снегонакопления (в миллиметрах водного эквивалента) на Антарктическом материке. Карта из Атласа Антарктики (М.: 1966. Т. 1) составлена В.М. Котляковым.

предположить, что на протяжении XX в. масса льда в Антарктиде растёт. Это имеет серьёзные глобальные последствия, поэтому требует более убедительных подтверждений.

#### БАЛАНС МАССЫ ЛЕДНИКА ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ

В недавней статье австралийских, британских

и российских ученых<sup>1</sup> подробно исследуются походы санно-тракторных поездов и работа советской станции в районе Полюса относительно недоступности, показывающая крайне малую скорость аккумуляции снега (около 22 мм водного эквивалента в год). Толщина снега с учетом низкой его

плотности в этом районе составляет примерно 5–6 см в год. Эта величина подтверждается двумя фотографиями бюста В.И. Ленина, установленного в первое посещение станции в 1965 г. и повторно сфотографированного в 2008 г. На второй фотографии мы видим постамент бюста, засыпанный за 43 года

<sup>1</sup> Gan I, Drewry D., Allison I., Kotlyakov V.M. Science and exploration in the high interior of East Antarctica in the twentieth century // Advances in Polar Science. June 2016. V. 27. № 2. P. 1–13.

трехметровой толщей снега, накопившейся за это время.

В прошлом для подсчета поверхностного баланса массы ледникового покрова Антарктиды использовали все имевшиеся результаты измерений количества отложенного снега в разных областях ледникового покрова. Но уже в 1980-х гг. на Антарктическом материке были выделены границы ледосборных бассейнов, и это дало возможность сравнить количество отлагающегося на поверхности снега с расходом льда в каждом бассейне через береговую линию.

В Восточной Антарктиде тогда насчитывали

13 крупных бассейнов, а в Западной Антарктиде – 4. Не для всех есть исчерпывающие данные об аккумуляции и стоке материкового льда. Мы обследовали бассейны лишь с надежной информацией о приходе и расходе в них льда. Такие территории занимают площадь 7435,7 тыс. км<sup>2</sup> из общей площади наземного оледенения Антарктиды (13 924 тыс. км<sup>2</sup>). Для оценки стока материкового льда мы использовали космические снимки, на которых видно положение линии налегания, то есть того замыкающего створа, через который массы льда поступают из ледосборных бассейнов

в океан по основным каналам стока – выводным ледникам и ледниковым потокам.

С помощью аэрофотозондирования, применяемого в Антарктиде с конца прошлого века, мы получили сведения о толщине льда в районе линии налегания для каналов стока отдельных бассейнов (Земля и Вселенная, 2010, № 5). На основе данных спутниковой геодезии и обработки амплитудных и интерферометрических составляющих спутниковых радарных изображений вычислена скорость течения льда в выводных ледниках в районе линии налегания. В результате удалось определить



*Бюст В.И. Ленина на вышке башни над домиком советской станции. Полюс относительно недоступности: слева – в 1965 г., справа – в 2008 г.*

Аккумуляция и сток материкового льда (км<sup>3</sup>/год) в отдельных районах Антарктиды\*

Ледосборные бассейны и их номера	Аккумуляция льда		Сток материкового льда	
	1960–1970 гг.	1990 гг.	1957–1970 гг.	1990–1997 гг.
Восточная Антарктида				
Восточная часть бассейна Уэдделла (15)	166,5	97,0	53,9	79,1
Станкомб-Уилс (16)	18,6	17,1	19,3	16,6
Ютулстраумен (17)	17,5	16,7	12,5	13,4
Ширазе (1)	18,6	28,2	12,5	15,1
Райнера (2)	15,9	24,1	10,2	14,9
Ламберта (3)	41,1	62,8	39,5	57,5
Денмена и Скотта (4)	36,5	45,8	30,6	44,0
Тотгена (5)	83,1	114,9	52,1	66,5
Пауэра и Фроста (6)	54,0	74,6	33,8	38,3
Мерца и Нинниса (7)	35,0	48,7	35,2	41,7
Земля Виктории (8)	19,6	25,8	9,9	17,5
Маллока (9)	8,5	8,2	5,6	6,8
Бёрда (10)	59,9	60,3	18,0	23,6
Всего в Восточной Антарктиде	491,7	623,6	333,1	435,0
Западная Антарктида				
Пайн-Айленда (13)	64,1	74,2	79,1	82,6
Туэйтса (12)	65,1	61,3	16,6	80,1
Бассейн Росса (11)	92,9	111,0	13,4	78,1
Западная часть бассейна Уэдделла (14)	109,5	127,0	15,1	128,0
Всего в Западной Антарктиде	331,6	373,5	14,9	368,8
Антарктида в целом	823,3	997,1	57,5	803,8

\* Номера ледосборных бассейнов см. на рисунке на стр. 31.

сток материкового льда Антарктиды во второй половине XX в. Оказалось, что во всех обследованных районах сток льда в 1990-х гг. возрос на 15–30%, по сравнению с 1960–1970 гг.

Что происходило в это время с аккумуляцией снега на поверхности ледникового покрова? К концу XX в. обобщены данные прямых и косвенных (дистанционных) измерений

снегонакопления в избранных бассейнах за последние десятилетия, использовались также модельные расчеты. В таблице приведены сведения о накоплении снега для тех же периодов, что и оценки стока материкового льда: 1960–1970-х гг. – на основе обобщения данных, полученных в период проведения Международного геофизического года; 1980–1990-х гг. –

с использованием расчетов и моделирования. Мы видим явный рост аккумуляции снега в Антарктиде за прошедшую четверть века.

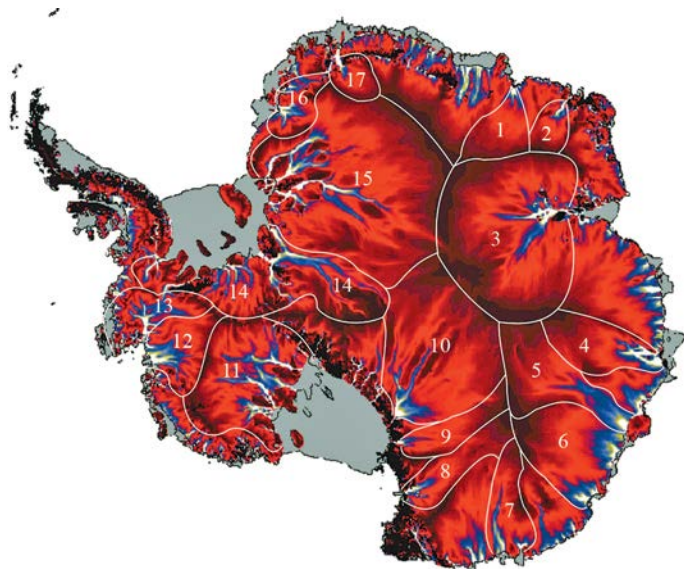
Сравним приход и расход массы льда в изученных бассейнах Антарктиды за прошедшие почти полвека. Суммарная годовая аккумуляция в них за это время выросла на 173,8 км<sup>3</sup>/год, еще больше вырос среднегодовой сток льда – на

Карта Антарктиды с указанием цифрами ледосборных бассейнов. 1980–1990 гг.

232,3 км<sup>3</sup>/год. Это значит, что за прошедшие 25–30 лет в Антарктиде заметно возросла интенсивность процессов аккумуляции – абляции.

В основных районах Восточной Антарктиды баланс массы остается положительным и даже возрастает к концу столетия. Иная картина в Западной Антарктиде. Похоже, что в 1960-х гг. баланс массы был, скорее всего, положительным и приблизился к нулевому в конце столетия, а в горных районах Пайн-Айленда и Туэйтса за прошедшие 25–30 лет он сменился с положительного (+54,2 км<sup>3</sup>/год) на отрицательный (–27 км<sup>3</sup>/год).

Итак, ледниковый режим Восточной и Западной Антарктиды далеко не одинаков. В условиях современного глобального потепления ледники Западной Антарктиды (подобно оледенению в других районах земного шара) сокращаются, тогда как масса льда в Восточной Антарктиде продолжает расти. Это представляет собой большое благо, так как замедляет рост уровня Мирового океана, обусловленного глобальным потеплением.



#### НОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА

На рубеже веков в исследованиях Антарктического ледникового покрова стали активно использоваться дистанционные методы измерений ряда геофизических параметров – со специализированных научных спутников. В обиход вошли три подхода к определению состояния и изменений баланса массы ледникового покрова. Конечно, это лишь начальный этап использования таких методов, поэтому, несмотря на ряд достоинств, в них сохраняются и некоторые ограничения.

Первый подход опирается на данные спутниковой радарной и лазерной альтиметрии, на их основе определяется масса ледникового покрова, в зависимости

от скорости изменения его толщины. Но для такого расчета необходимо знать среднюю плотность поверхностной толщи льда. Ее рассчитывают, исходя из численных моделей или предположений о природных процессах, вызывающих изменения толщины, и корректируют с учетом изменений в скорости уплотнения фирна (плотный зернистый и частично перекристаллизованный многолетний снег), для чего используют модели такого уплотнения.

Второй подход представляет собой оценку баланса массы в отдельных ледосборных бассейнах, для которых вычисляют разницу в приходе и расходе вещества. Накопление льда, определяемое поверхностным балансом массы в бассейне, оценивают





*Край Антарктического ледникового покрова в районе станции Новолазаревская (Россия). 2009 г. Фото В.М. Котлякова.*

на основе региональной климатической модели, а расход вещества вычисляют по потоку льда на линии налегания на основе наблюдений за скоростью движения льда и измерений его толщины у этой линии.

Третий подход состоит в определении изменений массы ледникового покрова с использованием данных спутниковой гравиметрии. Изменения массы, связанные с гляциоизостатическими движениями (вертикальными движениями земной коры под воздействием ледниковой нагрузки – главным гравиметрическим сигналом в Антарктиде), вычитают

из регистрируемых гравитационных аномалий и получают оценку баланса массы льда.

У всех этих методов, конечно, есть свои ограничения. Альтиметрию трудно использовать в районе Южного полюса и Антарктического полуострова. Методом баланса массы нельзя оценить отток льда на тех участках линии налегания, где толщина льда не известна. Оценки на основе спутниковой гравиметрии имеют эффективное разрешение около 300 км. Кроме того, применение всех этих методов осложняется неопределенностью моделей, необходимых для

оценки поверхностного баланса массы, уплотнения фирна и гляциоизостатических движений. Все три метода содержат систематические ошибки, которые остаются незамеченными в любом из этих подходов.

Рассматриваемые подходы опираются на результаты наблюдений, приспособленных именно для данного метода, поэтому каждый из них по-своему “чувствителен” к ошибкам и отклонениям в используемых данных. Так, при оценке баланса массы в отдельных ледосборных бассейнах используют модели снегонакопления на основе атмосферного

*Немецкие научные спутники "GRACE-1 и -2" на орбите. Рисунок DLR.*

реанализа для расчета поступления вещества на поверхность того или иного бассейна. В методах радиолокационной и лазерной альтиметрии используются те же самые поля для оценки эффективной плотности при измерениях колебаний объема толщи льда.

Гравиметрические оценки, выполненные в 2002–2009 гг. с помощью немецких научных спутников "GRACE-1 и -2" (Земля и Вселенная, 2003, № 1, с. 76; 2010, № 5), как и радарные и лазерные альтиметрические оценки, требуют учета гляциоизостатических движений, связанных с вертикальными перемещениями коренных пород. Они могут быть неверно интерпретированы – как изменения массы льда – по измерениям со спутников "GRACE", или толщины льда по измерениям радиолокационных и лазерных высотомеров. Поэтому во всех случаях применяется коррекция, которая может быть того же порядка, что и сам сигнал, вызванный современными изменениями массы льда. В результате неопределенности, связанные с коррекцией гляциоизостатических движений, – это главные гравиметрические,



ошибки, возникающие при исследованиях в Антарктиде. Небольшие различия в моделях процессов гляциоизостазии могут даже "исказить знак" изменений баланса массы льда, вычисленного на основе измерений со спутников "GRACE" для отдельных ледосборных бассейнов.

В последние годы неоднократно предпринимались попытки рассмотреть совместно результаты оценок баланса массы ледникового покрова Антарктиды, полученные разными методами. Простые арифметические средние цифры комбинированного анализа "маскируют" значительные различия между отдельными оценками и не учитывают общих источников ошибок. Объединить такие оценки статистически непросто, так как спутниковая гравиметрия, альтиметрия и балансовый метод

имеют разные пространственные и временные разрешения (а также соотношение ошибок).

В связи с этим недавно был предложен совершенно новый подход, учитывающий неодинаковые пространственно-временные свойства наборов данных и физические процессы. Этот вид моделирования позволяет не только интегрировать разные источники, но и анализировать скрытые физические процессы, такие как:

- тренды колебаний массы, связанные с изменениями динамики льда;
- аномальные отклонения поверхностного баланса массы;
- уплотнение фирна и вязкоупругое вздымание твердой Земли;
- длинноволновую реакцию гляциоизостатических движений;
- мгновенную упругую реакцию рассматриваемых масс.

**НОВЫЕ МЕТОДЫ  
ПОДТВЕРЖДАЮТ РОСТ ЛЬДА  
В ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЕ**

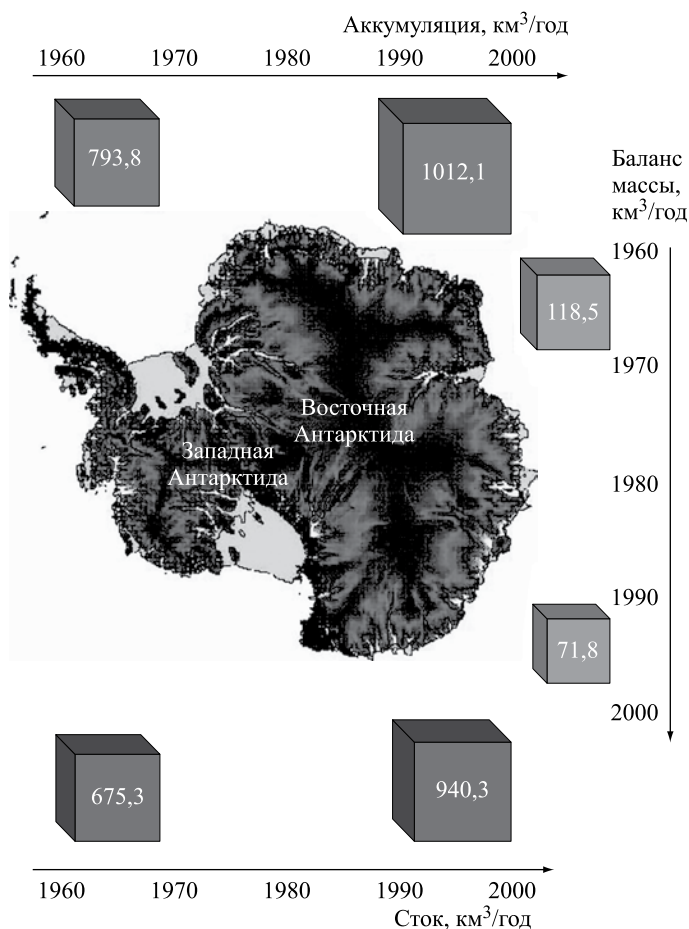
В 2015 г. опубликованы результаты работы группы американских гляциологов под руководством Дж. Звалли, где на основании использования новых методов сделан вывод о том, что масса Антарктического ледникового покрова увеличивается. Это утверждение вызвало волну критики, поскольку противоречит большинству исследований последнего времени.

Американские гляциологи на основе данных

научных спутников для исследований в области гляциологии "ICESat-1 и -2" за 2003–2008 гг. показали, что Антарктический ледниковый покров в целом прирастает на  $82 \pm 25 \times 10^9$  т/год. Однако это противоречит данным большинства других исследователей, обнаруженным после 2012 г., где утверждается, что среднее значение баланса массы ледникового покрова за тот же период составляет примерно  $-80$  (от  $+60$  до  $-100$ )  $\times 10^9$  т/год. Американские ученые утверждают, что

толщина льда Восточной Антарктиды (по спутниковым данным) растет со средней скоростью  $+1,3$  см в год. Повышение поверхности Восточной Антарктиды, занимающей площадь около 10 млн км<sup>2</sup>, на 1 см соответствует увеличению массы льда с  $35 \times 10^9$  т до  $92 \times 10^9$  т, то есть на  $57 \times 10^9$  т. Значение прироста массы ледяного покрова в этом промежутке зависит от расчета массы снега разной плотности (или льда).

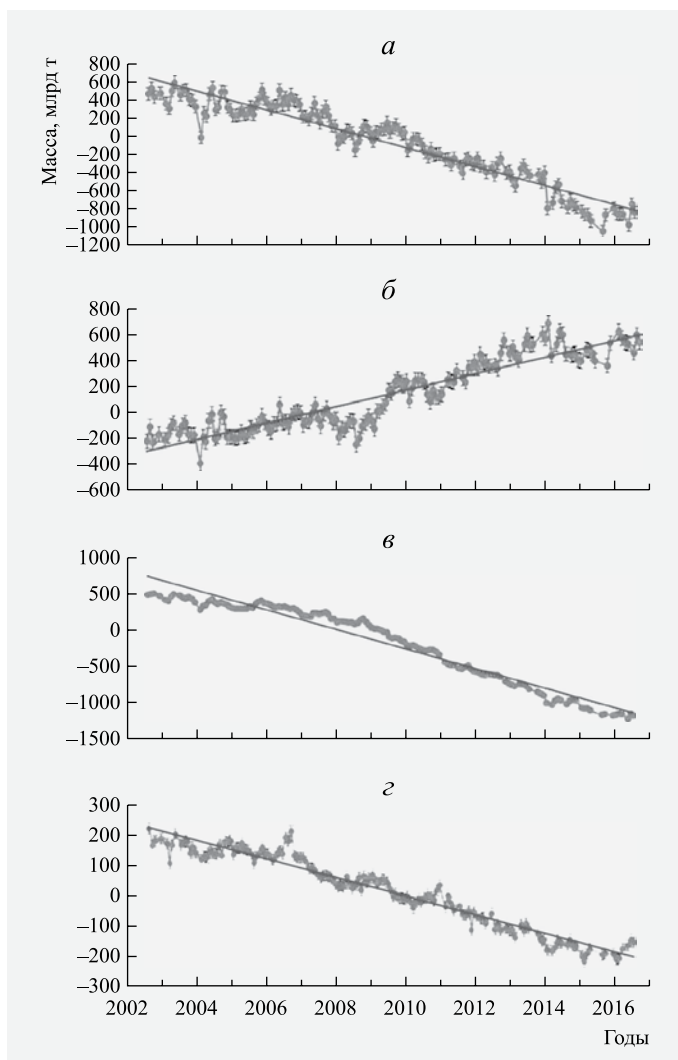
Увы, в наших руках нет прямых доказательств роста снегонакопления в Центральной Антарктиде. Однако последние исследования нескольких глубоких шурфов в районе озера Восток, выполненные российскими гляциологами (Земля и Вселенная, 2017, № 2), и наблюдения за ходом увеличения объема льда в центре материка позволяют сделать следующие выводы: для этого региона существует связь между температурой воздуха и скоростью снегонакопления. Период 1985–2015 гг. был самым теплым в Центральной Антарктиде за последние 250 лет



Графики хода изменений массы льда в Антарктиде с августа 2002 г. по июль 2016 г.: а – весь Антарктический ледниковый покров; б – Восточно-антарктический; в – Западно-антарктический ледниковый покров; г – Антарктический полуостров. По данным А. Гро и М. Хорвата (*“Geophysical Research Abstracts”, 2016, Т. 18*).

и, следовательно, в это время здесь отлагалось снега больше, чем в прошлом. Температура воздуха за последние 100 лет в районе станции “Восток” возросла примерно на 1 °С; это соответствует общему потеплению, которое, согласно палеогеографическим данным, составило порядка 1 °С.

На станции “Восток” измерения объема льда на специальном полигоне ведутся, начиная с 1970 г. Реконструированный ряд измерений включает данные трех глубоких шурфов за 1774–1999 гг., а инструментальный ряд – данные восьми неглубоких шурфов за 1944–1998 гг. Полученные материалы свидетельствуют о том, что скорость снегонакопления здесь составляет 21,8–22,5 мм водного эквивалента/год (по реконструированным рядам) и 22,6 мм в.э./год (по инструментальному ряду). Сводный ряд данных по всей Антарктиде говорит



об общем росте массы ее ледникового покрова на протяжении последних двух веков. Добавим к этому, что сглаженные кривые реконструированных значений температуры и скорости снегонакопления подобны на протяжении как минимум последних 150 лет: с повышением температуры увеличивается скорость аккумуляции льда. Особенно четко

эта зависимость выражена после 1950 г.: похолоданиям начала 1950-х гг. и начала 1990-х гг. соответствует снижению скорости роста массы льда, а потеплениям 1970-х и 2000-х гг. – напротив, увеличение снегонакопления.

Американские специалисты предположили, что небольшое повышение поверхности ледяного поля во внутренних

частях Восточной Антарктиды – это следствие роста аккумуляции, которое началось в конце последнего ледникового периода (около 14 тыс. лет назад) и еще “не уравнилось” оттоком льда. Такой несбалансированный рост аккумуляции (около 1 см льда в год) составляет примерно 50% от современной во внутренних частях Восточной Антарктиды. Значит, скорость стока льда здесь в современную эпоху составляет лишь около половины того, что можно было бы ожидать в сбалансированной системе.

Рассматриваемые результаты американских специалистов подверглись серьезной критике. По мнению некоторых ученых (если принять эти результаты), придется согласиться со следующим:

- исследования изменения высоты Восточной Антарктиды, по данным научного спутника “CryoSat-2” (ESA, 2010–2013 гг. Земля и Вселенная, 2010, № 5, с. 104), содержат ошибки, от трех до десяти раз превышающие погрешности;

- все другие недавние исследования баланса массы Антарктиды ошибочны;

- скорости движения льда Восточной Антарктиды, основанные на моделях аккумуляции (которые в настоящее время довольно близки

к наблюдаемым скоростям), содержат какую-то ошибку;

- полевые исследования изменений высоты поверхности льда над подледниковым озером Восток не обнаружили ее роста примерно на 20 см или больше в период между 2001 и 2013 гг.;

- озеро Восток не находится в гидростатическом равновесии;

- все другие работы по коррекции данных спутника “ICESat” существенно не верны.

Но если поправки, используемые американскими гляциологами, заменить другими вариантами коррекции, то окажется, что: во-первых, тренд изменений высоты поверхности Центральной Антарктиды будет близок к нулю; во-вторых, рост массы Антарктического ледникового покрова не превысит ее потерь; в-третьих, полевые исследования в районе подледникового озера Восток окажутся вполне точными; в-четвертых, результаты исследований, по данным ИСЗ “CryoSat-2” и другим недавним исследованиям, баланса массы Антарктического ледникового покрова, соответствуют друг другу.

Так рассуждают противники полученных выводов о возможном росте массы Антарктического ледникового покрова в наше время.

Правы ли они – покажет время. Но уже сейчас можно сделать главный вывод о том, что ледниковая поверхность над озером Восток представляет собой лучшую “опорную базу” для измерений высоты ледникового покрова (по сравнению с другими участками Центральной Антарктиды) – это важное заключение в отношении будущих наблюдений Южного полушария Земли со спутников.

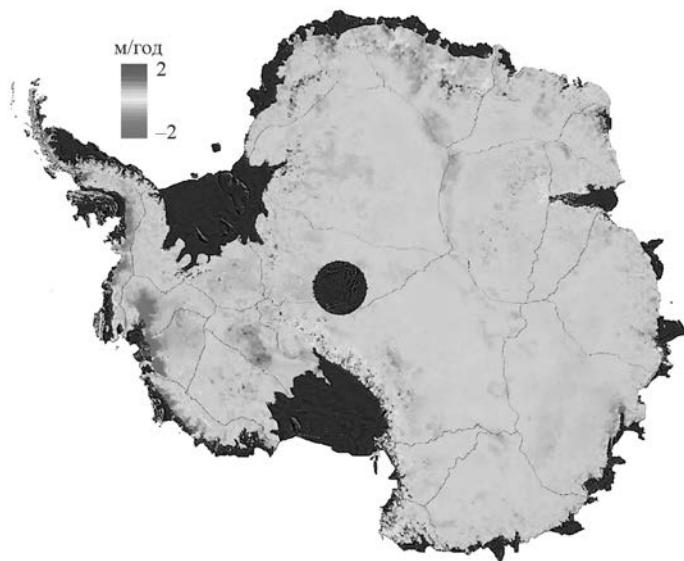
#### ДРУГИЕ ОЦЕНКИ БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВОГО ПОКРОВА

*Метод спутниковой гравиметрии.* Свои оценки баланса массы всего Антарктического ледникового покрова в 2002–2016 гг. приводит NASA, по данным гравиметрии со спутника “GRACE”. Согласно им, линейный тренд баланса массы всего покрова за указанный период составляет  $-121,9 \pm 79 \times 10^9$  т/год.

Аналогичные результаты с августа 2002 по июль 2016 гг. получили сотрудники Дрезденского технического университета. Для основных частей Антарктического материка они опубликовали следующие линейные тренды баланса массы льда:

- Восточно-антарктический ледниковый покров составляет  $+63,3 \times 10^9$  т/год;

Карта Антарктического ледникового покрова с указанием скорости изменения высоты поверхности ледника (м/год) с 2010 г. по 2013 г. (по результатам альтиметрии, выполненной ИСЗ "CryoSat-2"). По данным М. Макмиллана и др. ("Geophysical Research Letters", 2015. Т. 41. С. 3899).



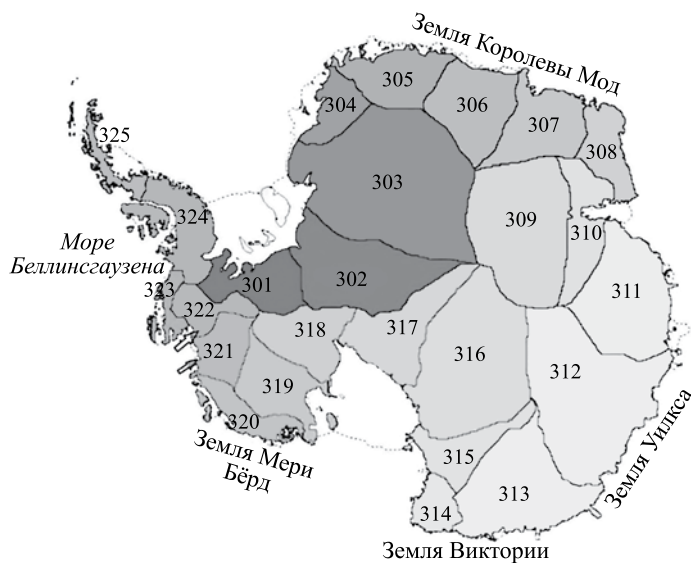
- Западно-антарктический ледниковый покров  $-135,7 \times 10^9$  т/год;
- Антарктический полуостров  $-30,7 \times 10^9$  т/год;
- весь Антарктический ледниковый покров  $-103,12 \times 10^9$  т/год.

Метод радарной альтиметрии. На основе анализа данных, полученных приборами на спутнике "CryoSat-2", установлены изменения массы в пределах всего ледникового покрова, в отдельных его ледосборах, а также в районах с динамическим дисбалансом в 2010–2013 гг. Этот новый набор данных охватывает почти весь континент. Согласно им, масса льда в Западной Антарктиде, Восточной Антарктиде и на Антарктическом полу-

острове изменялась соответственно со скоростью  $134 \pm 27$ ,  $-3 \pm 36$  и  $23 \pm 18 \times 10^9$  т/год. Средняя скорость убывания льда в Западной Антарктиде продолжает расти, и в рассматриваемый период была на 31% больше, чем в период с 2005 по 2010 гг.

Комбинированный метод оценки баланса массы льда. По данным спутниковой альтиметрии, гравиметрии и данных наземных навигационных станций системы GPS в 2003–2013 гг. с использованием специально моделирования получены результаты оценки

Карта Антарктиды с границами ледосборных бассейнов (обозначены цифрами). В соответствии с ними подсчитан баланс массы разных частей Антарктиды за 2003–2023 гг. По данным И. Сазгена и др. ("The Cryosphere", 2013. Т. 7. С. 1499).



Изменения массы Антарктического ледникового покрова ( $10^9$  т/год) в 2003–2013 гг.\*

Бассейны	Средние величины за отдельные периоды			
	2003–2006 гг.	2007–2009 гг.	2010–2013 гг.	2003–2013 гг.
Восточная Антарктида	41,2/18,1	46,6/17,1	78,5/18,7	56,3/18,1
Западная Антарктида	-40,6/10,5	-119,7/9,2	-175,3/9,9	-111,9/10,1
Антарктический полуостров	8,3/7,2	-30,7/6,8	-62,2/7,4	-28/7,2
Вся Антарктида	8,9/22,1	-103,8/20,6	-159,2/22,4	-83,6/21,9

\* В знаменателе – стандартное отклонение  $\sigma$  от основной величины.

баланса массы Антарктического ледникового покрова и его ледосборных бассейнов.

Мы видим, что в 2003–2013 гг. скорости снижения массы льда в Антарктиде заметно возросли, но эти потери происходили лишь в Западной Антарктиде и на Антарктическом полуострове, тогда как в Восточной Антарктиде она возрастала по  $56 \pm 18 \times 10^9$  т/год. Таким образом, основной массив приполярной суши Восточной

Антарктиды сохраняет устойчивую положительную тенденцию, то есть масса льда здесь по-прежнему растет.

#### РОСТ МАССЫ ЛЬДА В ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЕ

Современная эпоха глобального потепления на земном шаре не могла не отразиться на общем состоянии Антарктического ледникового покрова и его балансе массы. Потепление ведет к увеличению

содержания водяного пара в атмосфере, вызывая ее интенсивную циркуляцию и рост ледникового щита. Но вместе с тем потепление океанических вод и некоторый рост температуры льда приводят к увеличению скоростей его течения и большему расходу на береговой линии материка. Изучение и расчеты этих процессов и их соотношения очень непросты и до сих пор не получили своего решения.

Обширные исследования в южно-полярной области Земли в период Международного геофизического года привели к заключению о

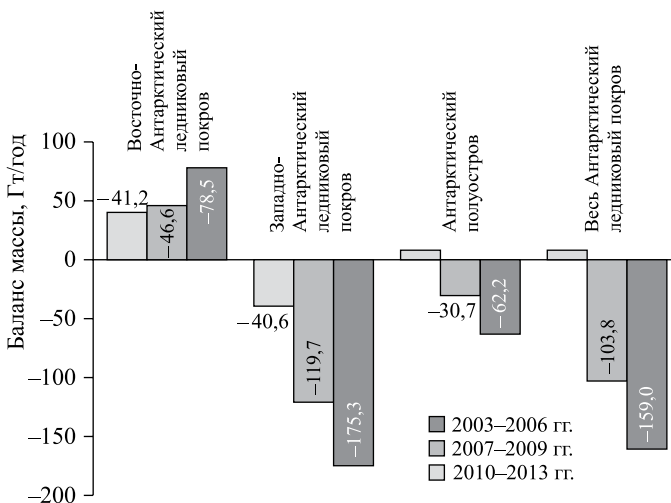


График трендов баланса массы (гигатонны в год) Антарктического ледникового покрова и его частей в 2003–2006 гг., 2007–2009 гг. и в 2010–2013 гг. По данным А. Мартин-Эспаньола и др. (*Journal of Geophysical Research. Earth Surface*, 2016. Т. 121. С. 182).

современном росте массы льда Восточной Антарктиды. Однако на рубеже веков в изучении глобальных процессов на Земле начали использовать спутниковую радарную и лазерную альтиметрию, а также спутниковую гравиметрию, позволяющую определить изменения массы льда на основе вызываемых ими гляциоизостатических движений. По мере совершенствования дистанционных исследований Земли

массовое применение таких данных породило развитие методов их использования для подсчета баланса материкового льда.

Анализ обширных материалов спутниковых исследований последних лет в целом подтверждает наши ранние заключения о продолжающемся росте массы льда в Восточной Антарктиде. Однако в Западной Антарктиде и на Антарктическом полуострове в настоящее время – наоборот –

происходит усиленное таяние льда, нивелирующее повышенный приход его массы в Центральной Антарктиде. Так что в целом в современную эпоху глобального потепления масса льда в Антарктиде, возможно, и убывает, несмотря на некоторый рост Восточно-антарктического ледникового покрова.

Настоящее исследование поддержано грантом Русского географического общества (проект № 06/2016-И).

---

## *Информация*

---

### **Полет к астероиду**

NASA и компания-производитель спутников связи “Space Systems Loral” (штат Калифорния, США) объединяют усилия для подготовки полета к одному из астероидов. Исследования астероидов стали одной из главных целей NASA. Фирма “Space Systems Loral” будет играть ключевую роль в подготовке предстоящей миссии,

которая позволит ученым доставить к астероиду научное оборудование для анализа его состава. Это – первый проект компании в области исследований глубокого космоса в рамках программы “Открытие” (“Discovery”), ставящей основной целью исследования Солнечной системы. По результатам конкурса, выбраны две новые программы по изучению астероидов, каждая – с бюджетом порядка 450 млн долларов.

Одна из программ включает отправку АМС в 2023 г. к металлическому астероиду (16) Психея (145 × 185 × 240 км) с высоким содержанием железа

и никеля; он находится на гелиоцентрической орбите, составляющей в перигелии 377,4 млн км, в афелии – 497 млн км и периодом обращения 4,99 года в Главном поясе астероидов. Станция должна достигнуть астероида через 5–7 лет. Выйдя на орбиту астероида, Психея будет производить сбор научных данных в течение одного года. Металлические астероиды – единственный класс объектов Солнечной системы, которые никогда прежде не наблюдали с близкого расстояния.

*Пресс-релиз NASA,  
3 марта 2017 г.*