

Ледники и ледниковые покровы

УДК 551.324.24

doi:10.15356/2076-6734-2017-2-149-169

Динамика массы льда в Антарктиде в эпоху потепления

© 2017 г. В.М. Котляков*, А.Ф. Глазовский, М.Ю. Москалевский

Институт географии РАН, Москва, Россия

*vladkot6@gmail.com

Dynamics of the ice mass in Antarctica in the time of warming

V.M. Kotlyakov*, A.F. Glazovsky, M.Yu. Moskalevsky

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*vladkot6@gmail.com

Received February 18, 2017

Accepted March 15, 2017

Keywords: *Antarctica, drainage basins, glacier mass balance, global warming, growth of ice mass, ice sheet, sea level.*

Summary

The modern age of global warming affect the general state of the Antarctic ice sheet and its mass balance. Studies of the Southern polar region of the Earth during the International Geophysical Year (1957–1958) called the assumption of growth in the modern ice mass in East Antarctica. However, with the development of new methods, this conclusion has been questioned. At the turn of the century the study of global processes Earth started to use the satellite radar or laser altimetry and satellite gravimetry, which allows determining change of different masses on the Earth, including ice bodies. From the beginning of the XXI century, these methods have been used to calculate the continental ice balance. In our study, we analyze different data of recent years, supporting the earlier conclusion on continued growth of the ice mass in East Antarctica. However, in West Antarctica and the Antarctic Peninsula, on the contrary, there is increased loss of ice, leveling the increased income of ice mass of in the Central Antarctica. So all in all in the modern era of global warming, the ice mass in Antarctica appears to be decreasing despite some growth of the East Antarctic ice sheet. Fluctuations of land ice mass reflect in the sea level variations, but in comparison with the scale of the Antarctic ice sheet its contribution to sea-level rise is not so significant. The main reason for this is that the mass accumulation in East Antarctica with significant probability prevails over the ice outflow.

Citation: Kotlyakov V.M., Glazovsky A.F., Moskalevsky M.Yu. Dynamics of the ice mass in Antarctica in the time of warming. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017. 57 (2): 149–169. [In Russian]. doi:10.15356/2076-6734-2017-2-149-169.

Поступила 18 февраля 2017 г.

Принята к печати 15 марта 2017 г.

Ключевые слова: *Антарктида, баланс массы ледника, ледниковый щит, ледосборные бассейны, потепление, увеличение массы льда, уровень моря.*

Анализируются исследования XX в., а также материалы последних лет, включая спутниковую альтиметрию (радарную и лазерную) и спутниковую гравиметрию, с помощью которых определяют изменение массы льда. Подтверждаются заключения гляциологов о продолжающемся росте массы льда в Восточной Антарктиде. Однако в Западной Антарктиде и на Антарктическом полуострове, наоборот, таяние льда усилилось, поэтому в целом в современную эпоху глобального потепления масса льда в Антарктиде, по-видимому, убывает, несмотря на некоторый рост Восточно-антарктического ледникового покрова.

Введение

Через несколько лет, в 2020 г., весь мир будет отмечать 200-летие величайшего географического открытия — появления на геогра-

фических картах шестого, Антарктического материка. В январе 1820 г. Русская кругосветная экспедиция под руководством Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева впервые увидела берег шестого континента. Это было важней-

шее географическое событие, последовавшее после заявления полувековой давности, сделанного великим английским мореплавателем Джеймсом Куком, о том, что люди вряд ли когда-либо смогут пробиться на юг и увидеть то, что скрывает Южный океан. Однако Русская экспедиция в поисках Южно-полярного материка прошла южнее полярного круга, и 28 января (по новому стилю) 1820 г., когда корабли находились в $69^{\circ}21'$ ю.ш. и $2^{\circ}15'$ в.д., моряки увидели большие бугристые ледяные поля, которые отличались от всех виденных до сих пор. Позднейшие исследования показали, что шлюпы «Восток» и «Мирный» находились всего в нескольких километрах от берега Антарктиды. С тех пор гипотетический Антарктический материк занял своё место на географических картах, а вскоре стало понятно, что почти весь он покрыт гигантским ледниковым щитом, который существует в Антарктиде уже много миллионов лет и, в отличие от Североамериканского и Европейского ледниковых покровов, за это время никогда полностью не исчезал с поверхности Антарктического материка.

Начиная с открытия Антарктиды русской экспедицией интерес к состоянию Антарктического ледникового покрова не ослабевал. В дальнейшем экспедиции Уэдделла (1822–1823 гг.), Дюмон-д'Юрвиля (1838–1840 гг.), Уилкса (1840 г.), Росса (1841 г.), Джерлаха (1898 г.), Норденшельда и Ларсена (1902 г.), Дригальского (1902 г.), Скотта (1902 и 1912 гг.), Ширазе (1911 г.), Моусона (1912 г.), Шеклтона (1908 г.), Фильхнера (1912 г.), Амундсена (1912 г.), Бёрда (1928–1941 гг.), Уилкинса (1928 г.), Элсуэрта (1933–1939 гг.) получили важные данные о положении краевых частей ледникового покрова и определили границы некоторых ледоразделов.

Масса антарктического льда как в прибрежной части, так и внутри континента не остаётся неизменной и существенно зависит от колебаний климата. Для современной эпохи характерно глобальное потепление, которое, естественно, воздействует и на состояние Антарктического ледникового покрова. Учитывая планетарную роль Антарктического ледника, попробуем оценить стабильность его состояния и возможное воздействие на уровень Мирового океана.

Первые сведения об увеличении массы Антарктического ледникового покрова

Интенсивные исследования в Антарктиде начались в конце 1940-х – начале 1950-х годов. В то время и Советский Союз начал обширные антарктические работы. Уже первые три года (1956–1958 гг.) активных советских антарктических исследований принесли новые важные сведения о режиме Антарктического ледникового покрова, и стало складываться мнение о превышении аккумуляции снега на Антарктическом ледниковом щите над его расходом [1–4]. На это указывало сравнение данных об аккумуляции снега на всём пространстве Антарктического материка и весьма редкие сведения о его расходе в краевой части ледникового покрова. Конечно, эти данные были отрывочны, но собранные вместе они убедительно показывали превышение прихода снега над расходом льда в Антарктиде. Это чётко видно на первой карте аккумуляции снега на всей площади Антарктического ледника, составленной в 1961 г. В.М. Котляковым [5].

Ещё по наблюдениям во время Международного геофизического года (1957/58 г.) отмечен рост количества выпадающих осадков и температуры на субантарктических островах. Так, на станции Литл-Америка среднегодовая температура с 1911 по 1957 г. выросла на три градуса – с $-27,2$ до $-24,2$ °С. Таким образом, потепление XX в., отмеченное в Арктике, наблюдается и в Антарктике. Повышение температуры приводит к усилению циркуляции атмосферы и росту количества выпадающих осадков. Эту особенность отмечал ещё Джеймс Скотт во время своего похода к Южному полюсу. В результате усиления меридионального обмена воздушных масс на материк поступает более тёплый, а следовательно, и более влажный воздух. Однако повышение температуры на несколько градусов не вызывает таяние снега внутри материка, так как морозы здесь не прекращаются, в то время как увеличение количества влаги приводит к более обильным снегопадам. Усиление питания антарктического ледника твёрдыми атмосферными осадками в периоды потепления связано также с повышенной влажностью воздуха – рост температуры приводит к повышению упругости (парциального давления) насыщенного водяного пара. Следовательно, вместе с глобальным

потеплением усиливается атмосферная циркуляция в Антарктике, увеличивается питание ледникового покрова и оледенение Антарктиды растёт. Этот процесс и наблюдается в виде роста аккумуляции снега в Антарктиде. В то же время расход массы, связанный главным образом с движением льда к морю и откалыванием айсбергов, также, по-видимому, растёт с повышением глобальной температуры, но в гораздо меньшей степени и с известным запаздыванием. Таким образом, можно предполагать увеличение массы льда в Антарктиде на протяжении всего XX в., что имеет свои глобальные последствия и требует более убедительных подтверждений.

Изменения баланса массы Антарктического ледникового покрова за 50 лет

В настоящее время Антарктический ледниковый покров занимает площадь 13,924 млн км² и содержит 26,92 млн км³ льда. Площадь покрова без шельфовых ледников составляет 12,295 млн км², а общий объём льда в этом случае равен 26,54 млн км³ [6]. Эти цифры сопоставимы лишь с обширными ледниковыми покровами прошлого. Весь ледниковый покров можно разделить на несколько ледосборных бассейнов, в пределах которых, правда с разной точностью, можно подсчитать поверхностный баланс массы и сравнить его с расходом льда через береговую линию.

В конце первого десятилетия XXI в. мы собрали значительный объём информации из разных источников в границах ледосборных бассейнов и основных каналов стока в Западной и Восточной Антарктиде, чтобы понять, как изменился суммарный баланс массы ледникового покрова за последние 50 лет, по крайней мере в Восточной Антарктиде. Эти данные разновременные и крайне неравномерно покрывают площадь Антарктического ледникового покрова. Кроме того, до настоящего времени нет надёжных оценок жидкого подледникового стока, хотя таяние на ложе ледника существует. В конце XX в. в Восточной Антарктиде выделяли 13 крупных ледосборных бассейнов (рис. 1, б): восточная часть бассейна Уэдделла (15; см. номера на рис. 1, б); Станкомб-Уилс (16); Ютулстрёумен (17); Ширазе (1); Райнера (2); Ламберта (3); Денмена и Скотта (4); Тоттена (5); Пауэра и Фроста (6); Мерца и

Нинниса (7); Земли Виктории (8); Маллока (9); Бёрда (10). В Западной Антарктиде — четыре ледосборных бассейна: Пайн-Айленда (13); Туэйтса (12); Росса (11); западная часть бассейна Уэдделла (14). Мы исследовали только те ледосборные бассейны Антарктиды, для которых имелась надёжная информация по аккумуляции и стоку материкового льда. Общая площадь исследованных нами бассейнов составила 7435,7 тыс. км² при площади наземного оледенения Антарктиды 13 924 тыс. км² [7, 8]. Основные материалы получены на базе космической информации. Для оценки стока материкового льда использовано положение линии налегания, т.е. того замыкающего створа, через который массы льда поступают из ледосборных бассейнов в океан по основным каналам стока — выводным ледникам и ледниковым потокам.

Первые массовые инструментальные измерения скоростей течения льда в краевых частях выводных ледников выполнены в период МГГ с помощью повторных наземных геодезических измерений и уточнены по аэрофотоснимкам, а дальнейшие — по космическим снимкам оптического диапазона. В конце XX в. стали применять новые радарные технологии. Успешное аэроудиозондирование значительной части Восточной Антарктиды позволило получить достоверные значения толщины льда и использовать их при оценках материкового стока в районе линии налегания для каналов стока отдельных ледосборных бассейнов [9]. Наконец, оценки скоростей течения льда выводных ледников в районе линии налегания получены на основе данных спутниковой геодезии и обработки амплитудных и интерферометрических составляющих космических радарных изображений. На основе всей суммы данных по толщине и скоростям движения материкового льда в районе линии налегания мы оценили сток материкового льда Антарктиды во второй половине XX в. (табл. 1). Эти оценки не противоречат имеющимся данным по большинству бассейнов для 1960–70-х годов. Из табл. 1 видно, что во всех исследованных бассейнах сток льда в 1990-х годах вырос на 15–30% по сравнению с 1960–70-ми годами.

Первая карта аккумуляция снега в Антарктиде составлена по результатам работ МГГ [5], и на ней ещё нет границ основных ледосборных бассейнов. Спустя 20 с лишним лет построена карта

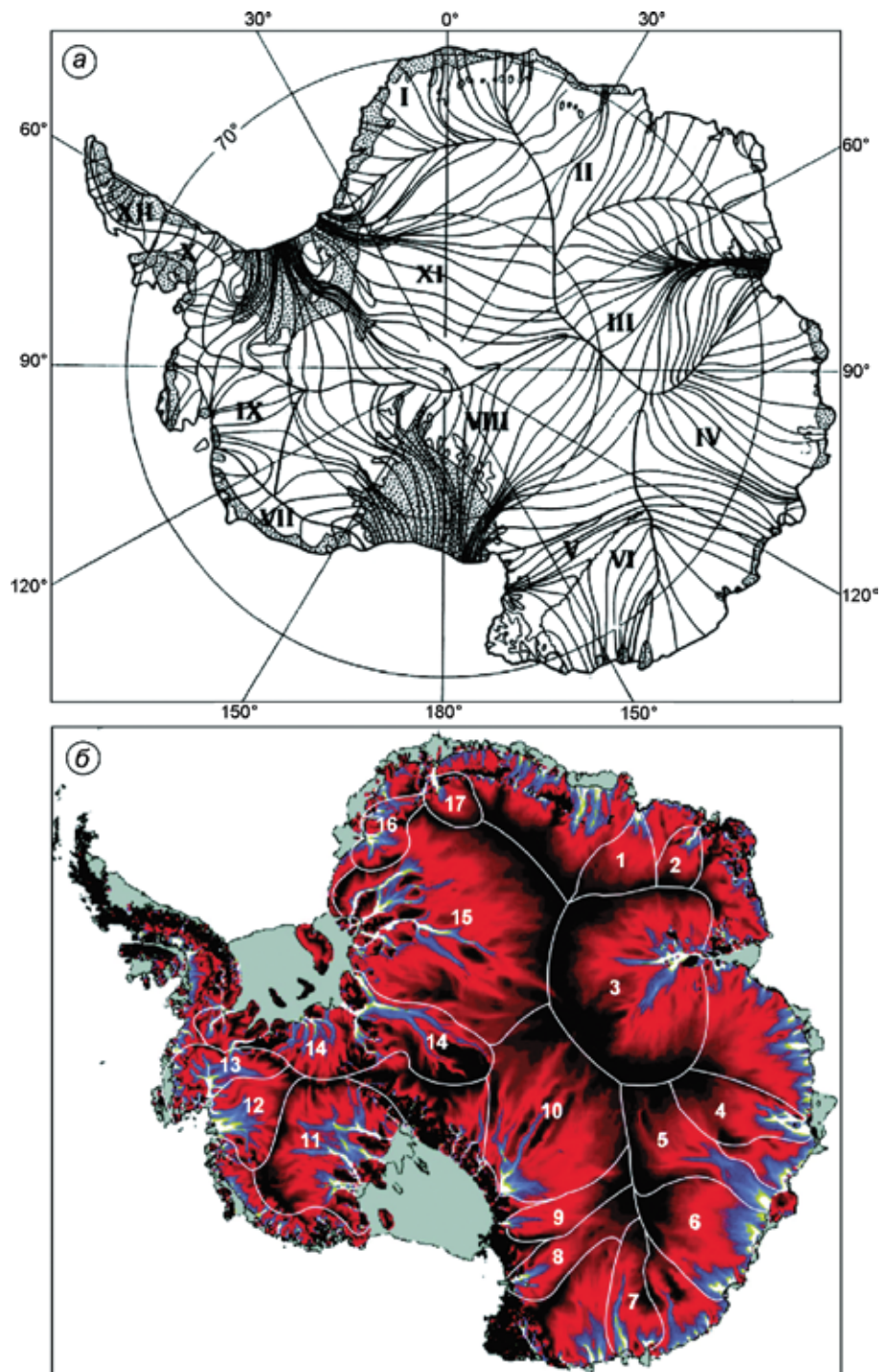


Рис. 1. Представления о ледосборных бассейнах Антарктического ледникового покрова: *a* – 1950–60-е годы (I–XII); *б* – 1970–80-е годы (1–17)

Fig. 1. Delineations of drainage basins of the Antarctic ice sheet in: *a* – 1950–60s (I–XII); *б* – 1970–80s (1–17)

распределения аккумуляции по ледосборным бассейнам с учётом данных о снегонакоплении, полученных в 1960–70-х годах [10]. Из-за небольшого объёма данных по снегонакоплению

при построении этой карты применена интерполяция, не учитывавшая в полной мере конфигурацию ледосборных бассейнов. В целях обеспечения сравнимости результатов мы оценивали

Таблица 1. Аккумуляция и сток материкового льда (км³/год) в отдельных ледосборных бассейнах Антарктиды*

Ледосборные бассейны		Аккумуляция		Сток материкового льда	
название	номер на рис. 1, б	1960–70-е годы	1990-е годы	1957–1970 гг.	1990–1997 гг.
<i>Восточная Антарктида</i>					
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
Тоттена	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
<i>Всего в Восточной Антарктиде</i>		491,7	623,6	333,1	435,0
<i>Западная Антарктида</i>					
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
<i>Всего в Западной Антарктиде</i>		331,6	373,5	14,9	368,8
<i>Антарктида в целом</i>		823,3	997,1	57,5	803,8

*Источники данных к этой таблице указаны в статье [6].

аккумуляцию в конце XX в. по тем же ледосборным бассейнам, что и ранее (см. рис. 1, б). Источниками информации служили прежде всего две работы – [11, 12], в которых обобщены данные прямых и дистанционных измерений снегонакопления последних десятилетий и расчётов аккумуляции по моделям. В табл. 1 приведены также оценки аккумуляции для тех же периодов, что и оценки стока материкового льда, т.е. для 1960–70-х годов, на основе обобщения данных, полученных в период МГГ, и для 1980-х и 1990-х годов с использованием расчётов и моделирования [10–18]. Приведённые цифры показывают рост аккумуляции за прошедшие четверть века.

Каков же итог сравнения прихода и расхода массы в изученных бассейнах Антарктиды с 1960–70-х до 1990-х годов? В начале этого периода суммарная годовая аккумуляция во всех изученных ледосборных бассейнах была равна 823,3 км³/год, а в 1990-х годах – 997,1 км³/год, т.е. выросла на 173,8 км³/год. Среднегодовой сток льда составлял в первый период

571,5 км³/год, а во второй – 803,8 км³/год, т.е. также вырос на 232,3 км³/год. Это означает, что за прошедшие 25–30 лет в Антарктиде заметно повысилась интенсивность процессов аккумуляции–абляции (рис. 2). Сравнивая начало и конец рассматриваемого периода, отметим, что в основных ледосборных бассейнах Восточной Антарктиды баланс массы остаётся положительным, причём положительная составляющая даже несколько увеличивается к концу столетия. По-иному складывается ситуация в Западной Антарктиде. Здесь в 1960-х годах баланс массы был, скорее всего, положительным и приблизился к нулевому в конце столетия. В ледосборных бассейнах Пайн-Айленда и Туэйтса за прошедшие 25–30 лет баланс массы сменился с положительного (54,2 км³/год) на отрицательный (–27 км³/год).

Таким образом, общий режим восточной и западной частей ледникового покрова Антарктиды далеко не одинаков. В условиях современного глобального потепления ледники Запад-

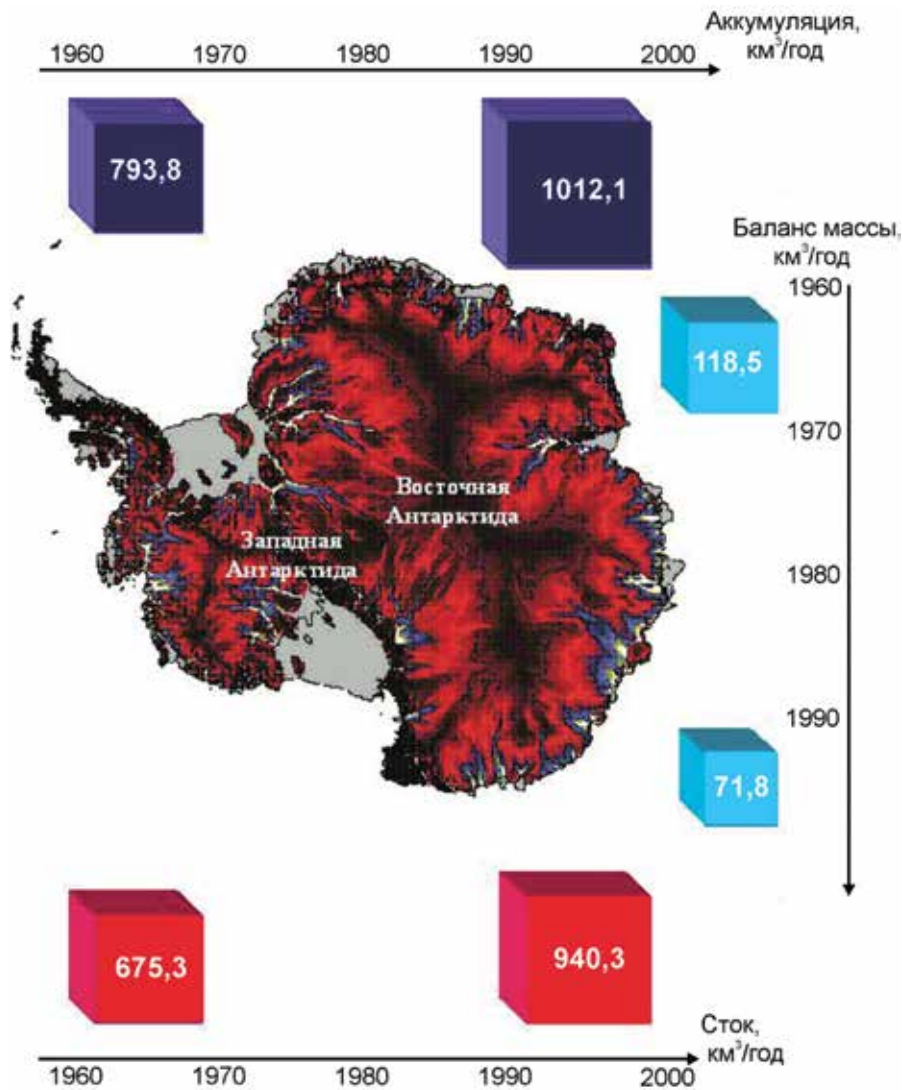


Рис. 2. Аккумуляция (синий цвет), сток льда (красный цвет) и баланс массы (голубой цвет) Антарктического ледникового покрова в 1960-х и 1990-х годах

Fig. 2. Accumulation (dark blue), losses (red) and mass balance (blue) of the Antarctic ice sheet in the 1960s and 1990s

ной Антарктиды, подобно оледенению в других районах земного шара, испытывают отступление, тогда как масса льда в Восточной Антарктиде, наоборот, продолжает расти, что представляет собой важный положительный фактор в развитии окружающей среды. Таковы результаты оценки баланса массы Антарктического ледникового покрова, выполненные на основе ограниченного набора данных, полученных в значительной мере традиционными исследованиями баланса массы ледникового покрова. Однако в XXI в. в арсенале гляциологических исследований Антарктиды появились новые дистанционные методы, которые привели к совершенно

иным, хотя и не бесспорным, а нередко и противоречивым результатам. Рассмотрим эти нетривиальные антарктические результаты, которые широко обсуждаются сейчас в гляциологической литературе.

Новые подходы к оценке баланса массы Антарктического ледникового покрова

В настоящее время утвердилось три подхода к определению состояния и изменений баланса массы ледникового покрова. Каждый из них имеет свои достоинства и ограничения.

1. *Первый подход* называют геодезическим, он базируется на данных спутниковой альтиметрии (радарной и лазерной). Измеренная с помощью этих методов скорость изменения высоты поверхности ледникового покрова пересчитывается в изменения его массы. Для выполнения этого пересчёта, необходимо знать поле средней плотности поверхностной толщи ледника. Плотность, как правило, выводится с помощью численных моделей или предположений о тех процессах, которые вызывают изменение высоты. Такие изменения обычно корректируют с учётом изменений в скорости уплотнения фирна, используя модели подобного уплотнения [19, 20]. Чтобы это сделать, необходимо проанализировать поля аккумуляции и температуры поверхности.

2. *Второй подход* называют оценкой баланса массы по дивергенции потока, по соотношению прихода и расхода массы. В этом подходе баланс массы определяют для отдельных ледосборных бассейнов, в пределах которых вычисляют разницу в приходе и расходе вещества. Приход вещества зависит от поверхностного баланса массы во всём бассейне, и его оценивают на основе региональной климатической модели, а расход вещества определяют по потоку льда на линии налегания и вычисляют с помощью наблюдений за скоростями движения льда и измерений толщины льда у этой линии [21, 22].

3. *Третий подход* состоит в определении изменений массы ледникового покрова с использованием данных спутниковой гравиметрии (GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment). Чтобы оценить баланс массы льда самого покрова, изменения массы, связанные с гляциоизостатическими движениями (GIA – glacio-isostatic adjustment) – доминирующим гравиметрическим сигналом в Антарктиде [23, 24], вычитаются из регистрируемых гравитационных аномалий.

У этих трёх подходов есть как общие, так и специфические ограничения. Альтиметрия (метод 1) имеет плохое покрытие в районе Южного полюса и Антарктического полуострова. Методом баланса массы (метод 2) нельзя оценить отток льда на тех участках линии налегания, где толщина льда неизвестна. Оценки по данным GRACE (метод 3) имеют эффективное разрешение на местности около 300 км. Кроме того, результаты всех трёх упомянутых методов подвержены влиянию тех ошибок, которые по-

рождаются неопределённостью моделей, необходимых для оценки поверхностного баланса массы (используемого в методах 1 и 2), уплотнения фирна (для метода 1) и гляциоизостатических движений (для метода 3). Трудно точно охарактеризовать неопределённости этих моделей. Некоторые из них могут содержать систематические ошибки, которые остаются незамеченными в каждом из этих подходов [25, 26]. Так, в недавно обновлённой версии (V2.3) Региональной атмосферной климатической модели (RACMO) [27], которая использована в большинстве исследований баланса массы (метод 2), средний поверхностный баланс массы Антарктиды оказывается на 111 Гт/год выше, чем в её предшествующей версии, причём бóльшая часть разницы (101 Гт /год) приходится на Восточную Антарктиду. Такая систематическая ошибка прямо влияет на оценки трендов баланса массы ледникового покрова, но сохраняется значительная статистическая неопределённость [28]. В итоге многие результаты применения этих методов сильно отличаются друг от друга [29].

Каждая из рассматриваемых оценок опирается на данные наблюдений, которые уникальны для своего метода, и каждый метод имеет свою собственную чувствительность к ошибкам и отклонениям в используемых данных. Например, в методах баланса массы (метод 2) смоделированные поля снегонакопления, полученные на основе атмосферного климатического реанализа, используются для оценки поступления снежных масс в ледосборные бассейны. В то же время методы радиолокационной и лазерной альтиметрии используют те же самые поля, но уже для оценки эффективной плотности снега и льда в измеренных изменениях объёма. Таким образом, масс-балансовые оценки весьма чувствительны к ошибкам в моделируемой средней скорости накопления, тогда как альтиметрические радиолокационные и лазерные оценки зависят от ошибок в колебаниях скорости накопления в меньшей степени.

Гравиметрические оценки GRACE, как и радарные, и лазерные альтиметрические оценки, требуют учёта гляциоизостатических движений, связанных с вертикальными перемещениями коренных пород. Такие вертикальные перемещения могут быть неверно интерпретированы – как изменения массы льда по измерениям со-

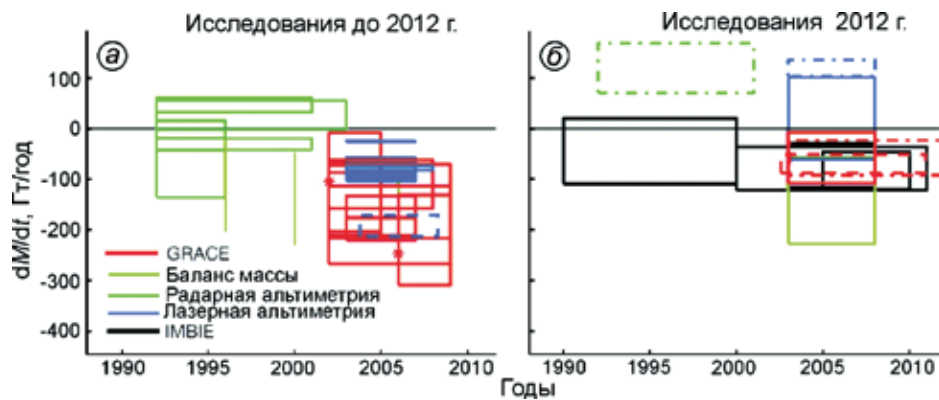


Рис. 3. Обобщение оценок скоростей изменений массы Антарктиды [28].

В работах, опубликованных до 2012 г. (а) и в 2012 г. (б), каждая осреднённая по времени оценка скорости изменений массы показана прямоугольником, ширина которого соответствует периоду оценки, а высота — погрешности оценки. Оценки для коротких периодов и их разброс показаны вертикальными линиями. Цвета указывают на метод оценки (см. легенду), тип линии — на источник данных. Работы 2012 г. охватывают оценки проекта IMBIE (Ice-sheet Mass Balance Inter-comparison Exercise) (сплошные линии) и оценки [30, 31] (прерывистые линии), [32] (пунктирно-прерывистые линии), [33] (пунктирные линии)

Fig. 3. Summary of estimates of rates of ice mass change for Antarctica [28].

In the studies published before 2012 (a) and in 2012 (b), each estimate of a temporally averaged rate of mass change is represented by a box whose width indicates the time period studied, and whose height indicates the error estimate. Single-epoch estimates are represented by vertical error bars when error estimates are available. Line colour indicates mass assessment technique (see key); line type indicates data source. 2012 studies comprise IMBIE (Ice-sheet Mass Balance Inter-comparison Exercise) combined estimates (solid lines), and estimates [30, 31] (dashed lines), [32] (dot-dashed lines), and [33] (dotted line)

спутников GRACE или как изменения толщины льда по измерениям радиолокационных и лазерных высотомеров. Поэтому во всех случаях необходимо ввести коррекцию на эти гляциоизостатические движения, но такая корректировка составляет лишь небольшую долю (около 5%) общего изменения высот, обычно измеряемого высотомерами. Однако коррекция гляциоизостатических движений в применении к данным GRACE может быть того же порядка, что и сам сигнал, вызванный современными изменениями массы льда. Таким образом, неопределённости, связанные с коррекцией гляциоизостатических движений, представляют собой главные источники ошибок в оценках GRACE в Антарктиде. Поэтому крайне важна точная количественная оценка сигнала гляциоизостатических движений; небольшие различия между моделями гляциоизостазии могут изменить знак изменений массы льда, определённых на основе измерений GRACE для отдельных ледосборных бассейнов.

В последние годы неоднократно предпринимались попытки интегрировать результаты оценок баланса массы ледникового покрова Антарктиды, полученные разными методами. Недавний пример такой интеграции — рабо-

ты [28, 29] (рис. 3). К сожалению, простые арифметические средние разных оценок [28] маскируют большие различия между ними и не учитывают общих источников ошибок. Объединение оценок статистически строгим образом — сложная задача, так как спутниковая гравиметрия, альтиметрия и балансовый метод имеют существенно разные пространственные и временные разрешения, а также соотношение ошибок.

Недавно был предложен совершенно новый подход [34, 35], который с помощью байесовской иерархической структуры учитывает различные пространственно-временные свойства разных наборов данных и физических процессов. Так, в работе [35] используются данные спутниковых высотомеров Envisat, ICESat и CryoSat-2, данные гравиметрии GRACE и наземные GPS-измерения вертикальных движений на выходах коренных пород в Антарктиде. Иерархическое байесово моделирование позволяет не только интегрировать разные источники данных, но и, судя по результатам авторов [35], раскрывать скрытые физические процессы: 1) тренды колебаний массы, связанные с изменениями динамики льда; 2) аномальные отклонения поверхностного баланса массы; 3) уплотнение фирна и

вязко-упругое воздымание твёрдой Земли, которые могут быть аппроксимированы в виде суммы двух отдельных компонент; 4) длинноволновую реакцию гляциоизостатических движений, 5) мгновенную упругую реакцию.

Недавнее заключение о росте массы Антарктического ледникового покрова и его критика

В 2015 г. появилась работа группы американского гляциолога Дж. Звалли [32], в которой сделан вывод, что масса Антарктического ледникового покрова увеличивается. Этот вывод как будто подтверждает заключения давних исследователей Антарктиды, но никак не согласуется с большинством недавно опубликованных работ (см. далее). В публикации группы Звалли на основе данных ICESat за 2003–2008 гг. сообщается, что ледниковый покров в целом прирастает на $+82 \pm 25$ Гт/год, тогда как среднее значение баланса массы покрова за тот же период, взятое более чем из десятка других работ, опубликованных с 2012 г., составляет примерно -80 ($+60/-100$) Гт/год (рис. 4).

Все последние оценки однозначно говорят о сокращении массы льда для всего континента.

В проекте IMBIE [28] выполнено согласование почти всех высококачественных оценок баланса массы, имевшихся в то время, в том числе и более ранних результатов Дж. Звалли. В исследовании IMBIE общий баланс массы льда за период наблюдений ICESat составил -72 ± 43 Гт/год для всей Антарктиды и $+58 \pm 31$ Гт/год отдельно для Восточной Антарктиды. Подчеркнём, что в работе Звалли с соавторами 2015 г. баланс массы для Восточной Антарктиды составляет $+136 \pm 28$ Гт/год, т.е. в 2,3 раза выше оценок IMBIE.

Согласно работе Звалли [32], средняя скорость изменения высоты поверхности Восточной Антарктиды по спутниковым данным составляет $+1,3$ см в год. Один сантиметр повышения поверхности Восточной Антарктиды, занимающей площадь около 10 млн км², соответствует увеличению массы с 35 до 92 Гт в зависимости от того – относим ли мы этот расчёт к массе снега разной плотности или льда. К сожалению, у нас нет прямых доказательств роста снегонакопления в Центральной Антарктиде, однако последние исследования нескольких глубоких шурфов в районе озера Восток и наблюдения за снегонакоплением в центре материка позволяют утверждать, что для этого региона существует значимая положительная связь между температурой

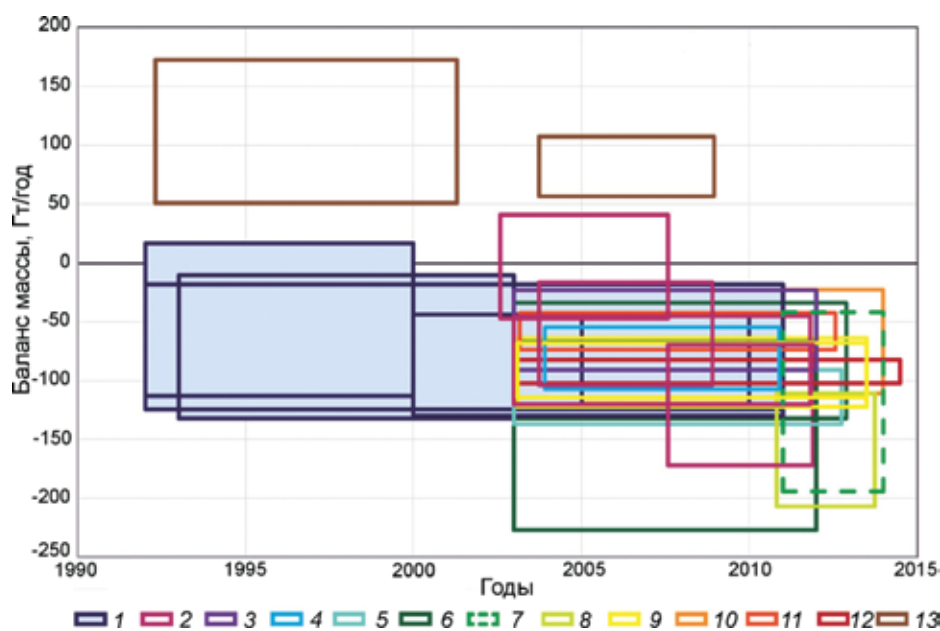


Рис. 4. Последние оценки баланса массы Антарктического ледникового покрова [35]:

1 – [28]; 2 – [36]; 3 – [37]; 4 – [38]; 5 – [30]; 6 – [39]; 7 – [40]; 8 – [41]; 9 – [42]; 10 – [43]; 11 – [44]; 12 – [33]; 13 – [32]

Fig. 4. Recent estimates of the mass balance of the Antarctic ice sheet [35]:

1 – [28]; 2 – [36]; 3 – [37]; 4 – [38]; 5 – [30]; 6 – [39]; 7 – [40]; 8 – [41]; 9 – [42]; 10 – [43]; 11 – [44]; 12 – [33]; 13 – [32]

воздуха и скоростью снегонакопления, а период 1985–2015 гг. был самым тёплым тридцатилетием в Центральной Антарктиде за последние 250 лет, и, следовательно, в это время здесь отлагалось больше снега, чем в прошлом [45].

Обобщённые данные о снегонакоплении на всём ледниковом покрове Антарктиды [46] показывают увеличение приходной части баланса массы на протяжении последних двух веков вместе с параллельным ростом температуры воздуха. Последняя увеличилась в Центральной Антарктиде за последние сто лет примерно на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что не противоречит данным о росте средней температуры на всём земном шаре с конца XVIII в. до начала XXI в. примерно на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сглаженные кривые реконструированных значений температуры и скорости снегонакопления в районе станции Восток на протяжении последних 150 лет подобны: с ростом температуры воздуха возрастает и скорость снегонакопления. Наиболее чётко эта зависимость проявилась после 1950 г.: вместе с похолоданиями начала 1950-х годов и начала 1990-х годов наблюдается и снижение скорости аккумуляции снега, а потеплениям 1970-х и 2000-х годов, наоборот, соответствует увеличение снегонакопления.

В работе Звалли [32] сделан вывод, что некоторое повышение поверхности во внутренних частях Восточной Антарктиды – это следствие роста аккумуляции, которое началось в конце последнего ледникового периода (около 14 тыс. л.н.) и ещё не уравновесилось оттоком льда. Предполагаемый несбалансированный рост аккумуляции (около 1 см льда в год) составляет примерно 50% современной аккумуляции во внутренних частях Восточной Антарктиды. Это означает, что скорость потока льда в наше время должна составлять здесь около 50% того, что можно было бы ожидать в сбалансированной системе стока льда. На самом деле, по некоторым данным, наблюдаемые скорости стока льда в Восточной Антарктиде составляют приблизительно 80% балансовых скоростей, представленных в последних оценках [26]. Серьёзные критические замечания к рассматриваемой работе Звалли приведены в исследовании [47]. Среди них важно замечание о способе коррекции данных ICESat между рабочими циклами альтиметрических съёмок. Для коррекции систематической ошибки – дрейфа со временем

измерений – используют измерения заведомо устойчивых поверхностей с независимой привязкой высот. Способ, использованный Звалли, сильно отличается от всех других, и его данные не совпадают с последними результатами точных прямых измерений [48].

Если рассматривать весь опубликованный массив оценок баланса массы Восточной Антарктиды, то можно пойти одним из двух путей. *Первый путь* состоит в том, чтобы принять те поправки между спутниковыми кампаниями и соответствующие им результаты изменения высоты ледниковой поверхности, которые приведены в [32]. В этом случае придётся согласиться со следующим: 1) два исследования изменения высоты Восточной Антарктиды по данным CryoSat-2 содержат ошибки, от трёх до десяти раз превышающие их установленные погрешности; 2) все другие недавние исследования баланса массы Антарктиды (см. рис. 4) ошибочны; 3) балансовые скорости Восточной Антарктиды, основанные на моделях аккумуляции, которые в настоящее время достаточно близки к наблюдаемым скоростям, содержат некоторую ошибку; 4) полевые исследования изменений высоты поверхности над подледниковым оз. Восток не обнаружили её роста примерно на 20 см или больше в период между 2001 и 2013 гг.; 5) оз. Восток не находится в гидростатическом равновесии; 6) все другие работы по коррекции данных между кампаниями ICESat существенно неправильны. Но если поправки, используемые Звалли, недействительны и их следует заменить другими вариантами коррекции, то окажется следующее: во-первых, тренд изменений высоты поверхности Центральной Антарктиды будет близок к нулю; во-вторых, рост массы Антарктического ледникового покрова не превысит её потерь; в-третьих, полевые исследования, выполненные в районе подледникового оз. Восток, окажутся вполне точными; в-четвёртых, результаты исследований по данным CryoSat-2 и другие недавние исследования баланса массы Антарктического ледникового покрова соответствуют друг другу. Так рассуждают противники выводов, полученных Дж. Звалли, о возможном увеличении массы Антарктического ледникового покрова в наше время. Им кажется более предпочтительным *второй путь* рассуждений. В его пользу говорят и последние результаты опреде-

ления изменений высоты поверхности над подледниковым оз. Восток, показавшие её высокую стабильность [48]. Отсюда следует вывод, что ледниковая поверхность над оз. Восток представляет собой лучшую опорную базу для измерений высоты ледникового покрова по сравнению с другими участками Центральной Антарктиды, и это — очень полезное заключение для проектирования будущих ICESat. В свою очередь, Дж. Звалли с коллегами [49], отвечая на критику, указывают на возможные источники погрешностей в других оценках и приводят новые доводы в пользу справедливости своей методики определения баланса массы и полученных ими выводов.

Оценка баланса массы ледникового покрова по другим данным

Спутниковая гравиметрия. Оценку баланса массы всего Антарктического ледникового покрова за 2002–2016 гг. приводит NASA по данным гравиметрии GRACE [50; <http://climate.nasa.gov/vital-signs/land-ice/>]. Согласно этим данным, линейный тренд баланса массы всего покрова за указанный период составляет $-121,9 \pm 79$ Гт/год (рис. 5). Похожие результаты за период с августа 2002 по июль 2016 г. получены сотрудниками кафедры геодезических исследований системы Земли из Дрезденского технического университета [51; https://data1.geo.tu-dresden.de/ais_gmb/#basin]. Они приводят

следующие линейные тренды для основных частей Антарктического материка (рис. 6):

Восточно-Антарктический ледниковый покров	+63,3 Гт/год
Западно-Антарктический ледниковый покров	-135,7 Гт/год
Антарктический полуостров	-30,7 Гт/год
Весь Антарктический ледниковый покров	-103,12 Гт/год

Радарная альтиметрия. Анализ этих данных, полученных на спутнике CryoSat-2, позволил установить изменения массы ледникового покрова, его отдельных ледосборов, а также районов с динамическим дисбалансом (IDI — regions of ice dynamical imbalance) за период 2010–2013 гг. [42] (рис. 7). Этот новый набор данных обеспечивает практически непрерывный (96%) охват всего континента в пределах 215 км от Южного полюса и даёт пятикратное увеличение количества данных в прибрежных районах, где происходит подавляющее большинство всех потерь льда. По этим данным, в период между 2010 и 2013 гг. масса льда в Западной Антарктиде, Восточной Антарктиде и на Антарктическом полуострове изменялась со скоростью -134 ± 27 , -3 ± 36 и -23 ± 18 Гт/год соответственно. Средняя скорость расхода льда в Западной Антарктиде продолжает расти, и в рассматриваемый период была на 31% больше, чем в период 2005–2010 гг.

Комбинированный метод оценки баланса массы на основе статистической инверсии. Комбинированный метод оценки баланса массы

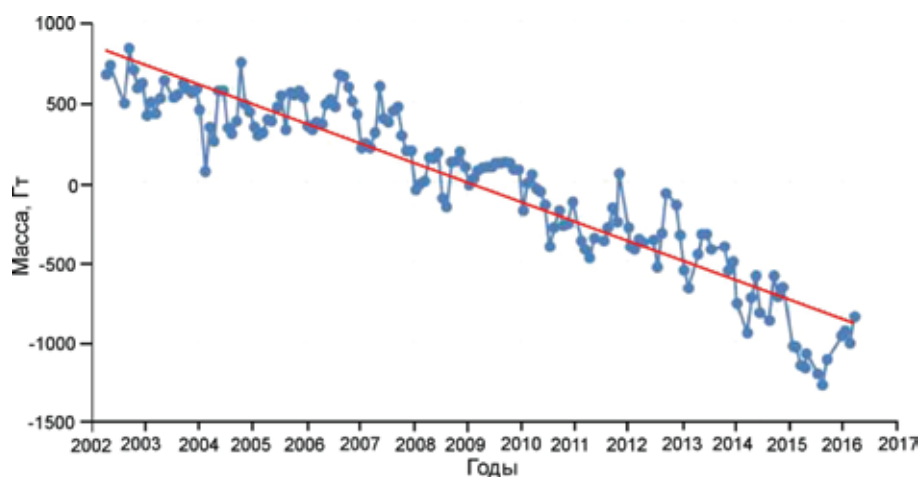


Рис. 5. Изменения массы Антарктического ледникового покрова (Гт) в отклонениях от среднего значения за 2002–2016 гг. По данным [50]

Fig. 5. Mass changes of the Antarctic ice sheet (Gt) shown relative to average for 2002–2016. After [50]

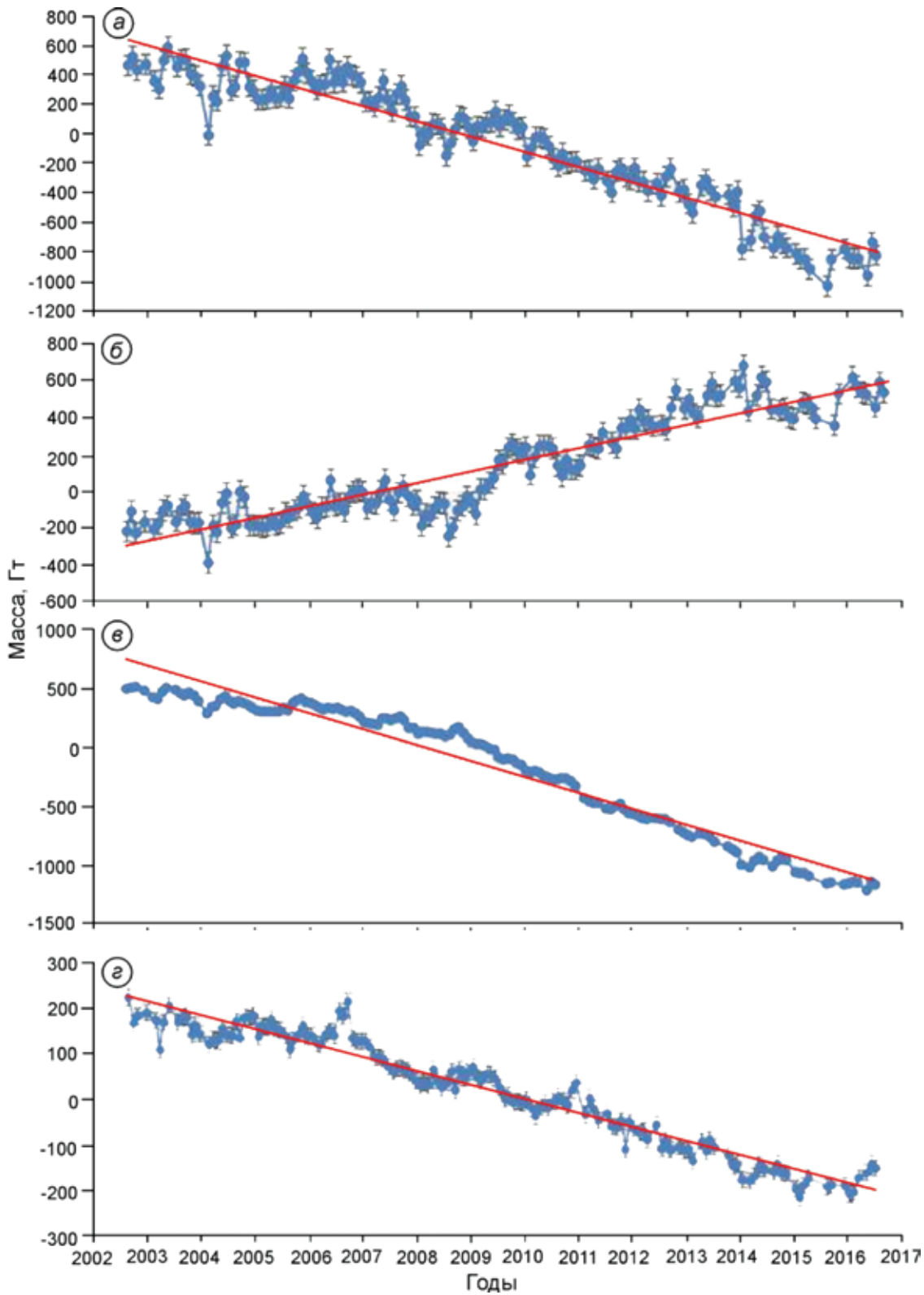


Рис. 6. Ход изменений массы льда в Антарктиде с августа 2002 по июль 2016 г.:
a – весь Антарктический ледниковый покров; *б* – Восточно-Антарктический ледниковый покров; *в* – Западно-Антарктический ледниковый покров; *г* – Антарктический полуостров. По данным [51]

Fig. 6. Antarctic mass change time series from August 2002 to July 2016:
a – Antarctic ice sheet in whole; *б* – East Antarctic Ice Sheet; *в* – West Antarctic Ice Sheet; *г* – Antarctic Peninsula. After [51]

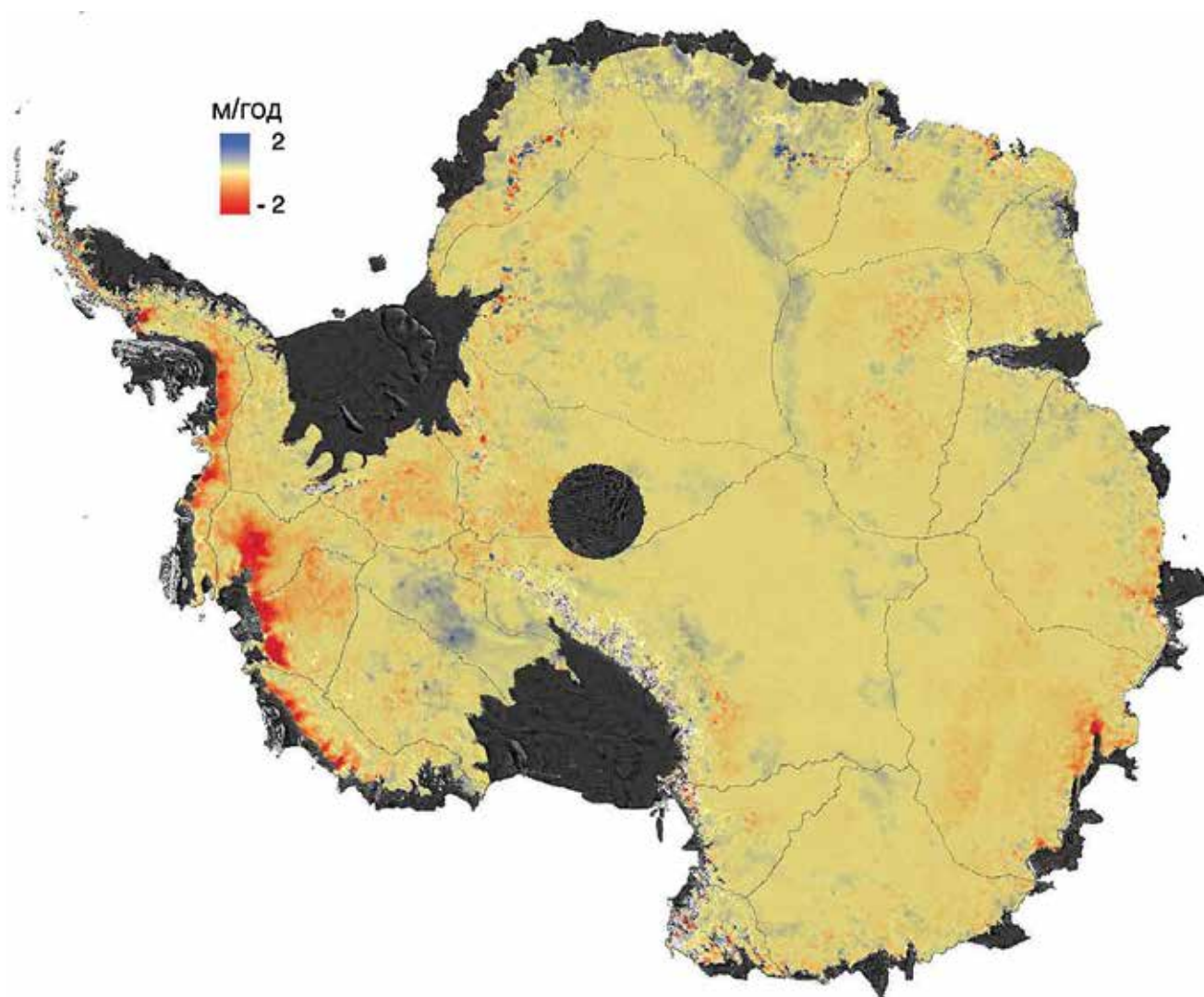


Рис. 7. Скорости изменения высоты поверхности Антарктического ледникового покрова с 2010 по 2013 г. по данным повторной альтиметрии CryoSat-2 (поле сглажено 25×25 км медианным фильтром).

Измерения CryoSat-2 не достигают Южного полюса на 215 км. По данным [42]

Fig. 7. Rate of elevation change of the Antarctic ice sheet between 2010 and 2013 determined from CryoSat-2 repeat altimetry (smoothed with a 25 by 25 km median filter).

The CryoSat measurements reach to within 215 km of the South Pole. After [42]

Антарктического покрова и его ледосборных бассейнов по данным спутниковой альтиметрии, гравиметрии, данных наземных GPS за период 2003–2013 гг. с применением иерархического байесовского моделирования реализован в работе [35]. Используемые в этом исследовании границы ледосборных бассейнов (рис. 8) взяты из работы [30] и не полностью совпадают с границами, установленными в [52]. Результаты оценок приведены в табл. 2 для каждого из трёх этапов и в целом для всего периода 2003–2013 гг. Сравнение результатов

оценок по отдельным этапам показывает, что в целом за 2003–2013 гг. скорости расхода массы льда в Антарктиде заметно возросли (рис. 9). В этот период потеря массы Антарктического ледникового покрова происходила со скоростью -84 ± 22 Гт/год, причём основные потери были в Западной Антарктиде (-112 ± 10 Гт/год), а также на Антарктическом полуострове (-28 ± 7 Гт/год). Вместе с тем в Восточной Антарктиде масса льда возрастала (56 ± 18 Гт/год). Каких-либо чётких тенденций в отдельных ледниковых бассейнах установлено не было. С помощью этого метода

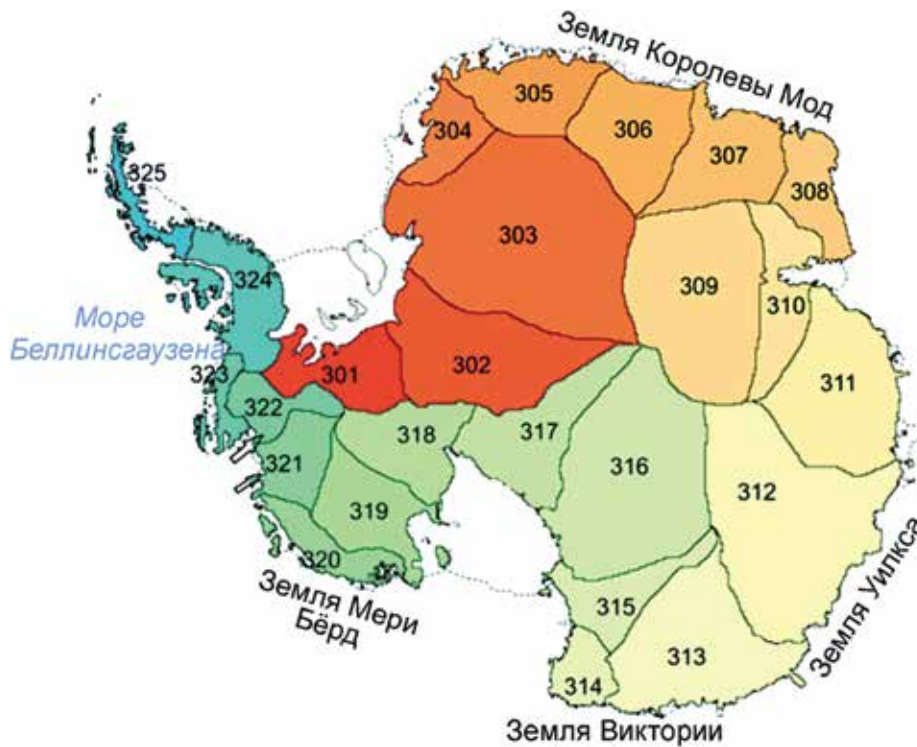


Рис. 8. Границы ледосборных бассейнов. По [30]
Fig. 8. Drainage basin locations. After [30]

обнаружена устойчивая негативная тенденция баланса массы льда в южной части Антарктического полуострова.

**Антарктический материк и колебания уровня
 Мирового океана**

Состояние баланса массы Антарктического ледникового покрова отражается на положении уровня Мирового океана. Вклад Антарктического ледника в положение уровня моря может быть сравним лишь с аналогичным вкладом, вызываемым процессами, происходящими в Гренландии. С 1880 г. до нашего времени средний глобальный уровень Мирового океана вырос на 21–24 см, при этом с 1993 г. уровень повысился на 8 см [53]. По некоторым утверждениям [54], с начала XX в. скорость подъема уровня Мирового океана была выше, чем в любой другой сопоставимый период на протяжении последних 2700 лет. Однако это — всего лишь предположения, в действительности результаты многочисленных работ последних лет [28] дают следующие значения подъема

уровня океана за счёт уменьшения массы льда в Антарктиде, мм/год:

1992–2011 гг.	$0,195 \pm 0,074$
1992–2000 гг.	$0,134 \pm 0,118$
1993–2003 гг.	$0,196 \pm 0,078$
2000–2011 гг.	$0,242 \pm 0,0340$
2005–2010 гг.	$0,225 \pm 0,0259$

Согласно этим расчётам, на рубеже веков уровень Мирового океана в результате деградации Антарктического ледникового щита повышается со скоростью 0,15–0,2 мм в год (с ошибкой расчётов от 15 до 40%). Однако подчеркнём, что, несмотря на значительно меньшие размеры, главный вклад в повышение уровня Мирового океана принадлежит Гренландскому ледниковому покрову, который деградирует гораздо интенсивнее (рис. 10). Очевидно, что приведённые на рис. 10 и ранее в тексте оценки скорости повышения уровня океана «за счёт Антарктиды» напрямую связаны с оценками скорости изменения баланса массы (уменьшения массы льда) на этом материке. Такой пересчёт вполне очевиден, так как в соответствии с известной площадью Мирового океана подъём его уровня на 1 мм соответствует стайванию 362,5 Гт льда.

Таблица 2. Изменения массы льда Антарктического ледникового покрова, его отдельных частей и ледосборных бассейнов в 2003–2013 гг. (в числителе, Гт/год; в знаменателе – стандартное отклонение). По данным [35]

Ледосборные бассейны (см. рис. 8)	Среднее за период			
	2003–2006 гг.	2007–2009 гг.	2010–2013 гг.	2003–2013 гг.
301	7,2/2,9	4,5/2,6	-2,6/2,8	2,9/2,8
302	2,3/4,3	1,9/3,6	-10,5/3,6	-2,5/3,9
303	-0,8/6,4	-1,1/6,1	8,2/6,7	2,4/6,4
304	2/2,4	3,2/2,2	6,4/2,4	3,9/2,3
305	-7,4/3,5	15,2/3,3	23,9/3,7	10,1/3,5
306	3,1/5	13,1/4,9	28/5,2	14,9/5,1
307	10/4,8	20,2/4,6	12,4/4,8	13,7/4,8
308	1,9/3,6	4,7/3,4	15,3/3,6	7,5/3,6
309	3/5	2,1/4,8	-2,7/5,2	0,7/5
310	3,3/3,3	0,8/3,1	5,4/3,2	3,4/3,2
311	13,4/4,9	12,3/4,6	8,4/5,3	11,3/5
312	21,2/7,7	26,1/7,4	-29,7/8,3	4/7,8
313	-3/5,8	-33,6/5,7	-0,9/6,3	-10,6/6
314	-4,3/2	-6,4/1,8	-4,2/2,3	-4,9/2,1
315	-2,6/2,1	-2,2/2	4,1/2,3	0,1/2,1
316	-1,9/4,2	-7,9/4,1	8,5/4,4	0,3/4,3
317	1/2,9	-1,8/2,4	6/2,5	2/2,6
318	14,3/3,1	17,4/2,6	35,3/2,9	22,8/2,9
319	-3,1/4,5	0,8/4,1	-3,3/4,4	-2,1/4,4
320	-11,7/4,9	-31,6/4,4	-48,6/4,6	-30,6/4,7
321	-39,9/4,6	-74,4/4,2	-1,7/4,5	-64,8/4,5
322	-16/3,6	-39,9/3,2	-56/3,1	-37,4/3,5
323	8,6/3,6	3,4/2,6	-18,6/3,3	-2,7/3,5
324	17,1/5,5	-15,7/5	-39,4/5,3	-12,4/5,3
325	-8,8/4,7	-15,1/4,5	-22,8/5,1	-15,6/4,8
<i>Восточная Антарктида</i>	41,2/18,1	46,6/17,1	78,5/18,7	56,3/18,1
<i>Западная Антарктида</i>	-40,6/10,5	-119,7/9,2	-175,3/9,9	-111,9/10,1
<i>Антарктический полуостров</i>	8,3/7,2	-30,7/6,8	-62,2/7,4	-28/7,2
<i>Вся Антарктида</i>	8,9/22,1	-103,8/20,6	-159,2/22,4	-83,6/21,9

По разным оценкам, вклад Антарктиды в состояние уровня Мирового океана в первом десятилетии XXI в. находится в пределах от $-0,06 \pm 0,23$ до $+0,16 \pm 0,14$ мм/год [28]. Такой весьма незначительный вклад (по сравнению с масштабами Антарктического ледникового покрова) объясняется природными процессами на обширных пространствах ледникового покрова Восточной Антарктиды, где, как мы показали в этой статье, накопление массы преобладает над расходом льда. Ответить на вопрос о том, сколько времени продлится такое преобладание, трудно, но можно утверждать, что в силу инерции природных процессов Восточно-ан-

тарктический ледниковый щит ещё долго будет служить своеобразным стабилизатором уровня Мирового океана.

Заключение

Современная эпоха глобального потепления на земном шаре не могла не отразиться на общем состоянии Антарктического ледникового покрова и балансе его массы. Потепление ведёт к увеличению содержания водяного пара в воздушных массах, вызывает интенсификацию атмосферной циркуляции и рост снегона-



Рис. 9. Тренды баланса массы (Гт/год) Антарктического ледникового покрова и его частей для трёх периодов: 2003–2006, 2007–2009 и 2010–2013 гг. По [35]

Fig. 9. Average mass trends in the mass balance (in Gt/yr) of the Antarctic ice sheet and its parts for three periods: 2003–2006, 2007–2009 and 2010–2013. After [35]

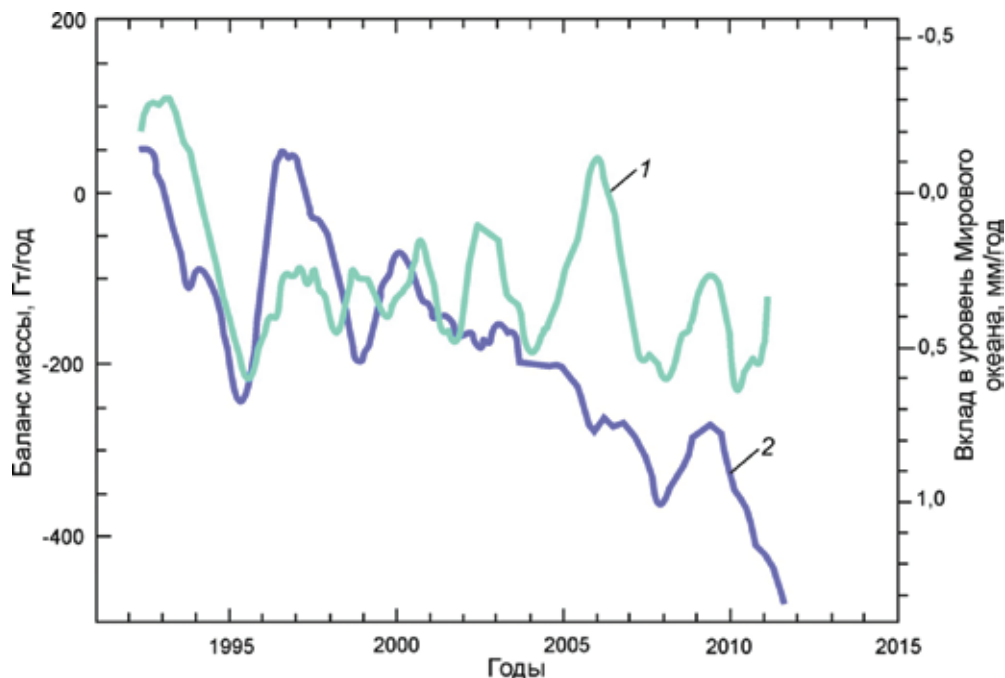


Рис. 10. Вклад в уровень Мирового океана убывания Антарктического (1) и Гренландского (2) ледниковых покровов. По [28]

Fig. 10. Contribution of the Antarctic (1) and Greenland (2) ice sheets to the sea level change. After [28]

копления на поверхности ледникового щита. Вместе с тем потепление океанических вод и некоторое увеличение температуры льда приво-

дят к росту скоростей течения льда и большому расходу льда на береговой линии материка. Изучение и расчёты этих процессов и их соотно-

шения непросты и до сих пор не получили законченного решения.

Обширные исследования в южно-полярной области Земли в период Международного геофизического года (1957–1958 гг.) вызвали предположение о современном росте массы льда в Восточной Антарктиде. Такое предположение находило своё подтверждение и в последующие десятилетия и вызывало естественное удовлетворение, так как очевидно, что подобный процесс замедляет повышение уровня Мирового океана, вызываемое усиленным таянием льдов в умеренных широтах. Однако по мере развития новых методов исследований такое заключение начало ставиться под сомнение. На рубеже веков в изучении глобальных процессов на Земле начали использовать спутниковую альтиметрию (радарную и лазерную), а также спутниковую гравиметрию, позволяющие определять изменения массы, в том числе льда, приводящие к гляциоизостатическим движениям. Такие исследования в последние годы стали массовыми, что вызвало быстрое развитие методов использования этих данных для подсчёта баланса материкового льда.

В нашем исследовании выполнен анализ обширных материалов последних лет, подтверждающих ранние заключения гляциологов о продолжающемся росте массы льда в Восточной Антарктиде. Однако в Западной Антарктиде и на Антарктическом полуострове в наше время, наоборот, происходит усиленное таяние льда, нивелирующее повышенный приход массы льда

в Центральной Антарктиде. Поэтому в целом в современную эпоху глобального потепления масса льда в Антарктиде, по-видимому, снижается, несмотря на некоторый рост Восточно-Антарктического ледникового покрова. В результате уровень Мирового океана повышается за счёт стаивания ледникового покрова Антарктиды не более чем на 0,1 мм в год.

Итак, колебания массы материкового льда в Антарктиде, естественно, отражаются на уровне Мирового океана. Однако по сравнению с масштабами Антарктического ледникового покрова его вклад в повышение уровня моря незначителен. Главная причина этого заключается в том, что в Восточной Антарктиде накопление массы со значительной долей вероятности преобладает над расходом льда.

Заканчивая статью, подчеркнём: ледниковый покров Антарктиды, представляющий собой неотъемлемую часть земного шара на протяжении многих миллионов лет, будет и дальше играть важную роль для человечества, и следует продолжать интенсивное его изучение, не забывая о необходимости охраны этого исключительного феномена нашей планеты.

Благодарности. Настоящее исследование выполнено при поддержке Русского географического общества (грант № 06/2016-И).

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Geographical Society (grant number 06/2016-И).

Литература

1. Меллор М. Изучение баланса массы льда в Антарктиде // МГИ. Хроника, обсуждения. 1961. Вып. 1. С. 152–164. Пер. с англ.
2. Листер Х. Климат и вещественный баланс ледника. Геофизические исследования государственной трансантарктической экспедиции // МГИ. Хроника, обсуждения. 1961. Вып. 1. С. 165–172. Пер. с англ.
3. Котляков В.М. Интенсивность питания ледникового покрова Антарктиды // МГИ. Хроника, обсуждения. 1961. Вып. 1. С. 53–58.
4. Котляков В.М. О современном увеличении массы ледникового покрова Антарктиды // МГИ. Хроника, обсуждения. 1962. Вып. 5. С. 39–44.
5. Котляков В.М. Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 246 с.
6. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G.,

References

1. Mellor M. Mass balance studies in Antarctica. *Journ. of Glaciology*. 1959. V. 3. № 26. P. 522–533.
2. Lister H. The climate and Ice mass balance. *Geophysical investigations of the Commonwealth Trans-Antarctic Expedition. Geographical Journal*. 1959. V. 125. № 3–4. P. 343–351.
3. Kotlyakov V.M. Intensity of nourishment of the Antarctic ice sheet. *Data of Glaciological Studies*. 1961, 1: 53–58. [In Russian].
4. Kotlyakov V.M. On the present-day increase of the Antarctic ice sheet mass. *Data of Glaciological Studies*. 1962, 5: 39–44. [In Russian].
5. Kotlyakov V.M. The snow cover of the Antarctic and its role in the present-day glaciation of the continent. Jerusalem, 1966. 256 p. Translation from Russian.
6. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D.,

- Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Ripplin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *The Cryosphere*. 2013. № 7. P. 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
7. Котляков В.М., Васильев Л.Н., Москалевский М.Ю., Хромова Т.Е. Сток материкового льда и баланс массы Антарктического ледникового покрова // *Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы*. Т. 3. Ч. 2. Природные процессы в полярных областях Земли. М.: изд. Ин-та географии РАН, 2009. С. 97–106.
 8. Котляков В.М., Васильев Л.Н., Москалевский М.Ю. Изменение баланса массы Антарктического ледникового покрова за 50 лет // *ДАН*. 2011. Т. 438. № 2. С. 263–266.
 9. Москалевский М.Ю., Хромова Т.Е. Динамика стока материкового льда Восточной Антарктиды во II половине XX века // *Арктика и Антарктика*. 2008. Вып. 7 (41). С. 56–64.
 10. Giovinetto M.B., Bentley C.R. Surface balance in ice drainage systems in Antarctica // *Antarctic Journ. of the United States*. 1985. V. 20. № 4. P. 6–13.
 11. Vaughan D.G., Bamber J.L., Giovinetto M.B., Russel J., Cooper A.P.R. Reassessment of net surface mass balance in Antarctica // *Journ. of Climate*. 1999. V. 12. № 4. P. 933–946. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<0933:RO NSMB>2.0.CO;2.
 12. Giovinetto M.B., Zwally H.J. Spatial distribution of net surface accumulation on the Antarctic ice sheet // *Annals of Glaciology*. 2000. V. 31. P. 171–178. doi: 10.3189/172756400781820200.
 13. Атлас Антарктики: Т. 1. М.-Л.: изд. ГУГК МГ СССР, 1966. 225 с.
 14. Атлас Антарктики: Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 598 с.
 15. Bull C. Snow accumulation in Antarctica // [Contrib. № 156. Institute of Polar Studies, Ohio State University]. *Research in Antarctic*. Washington, D.C: American Association for the Advancement of Science, 1971. P. 367–421.
 16. Котляков В.М., Барков Н.И., Лосева И.А., Петров В.И. Новая карта питания ледникового покрова Антарктиды // *МГИ*. 1974. Вып. 24. С. 155–159.
 17. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М.: изд. РАН, 1997. 392 с.
 18. Котляков В.М. Избранные сочинения: Т. 1. Гляциология Антарктиды. М.: Наука, 2000. 431 с.
 19. Arthern R.J., Vaughan D.G., Rankin A.M., Mulvaney R., Thomas E.R. In situ measurements of Antarctic snow compaction compared with predictions of models // *Journ. of Geophys. Research*. 2010. V. 115 (F3): F03011. doi: 10.1029/2009JF001306.
 - Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Ripplin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*. 2013, 7: 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
 7. Kotlyakov V.M., Vasil'ev L.N., Moskalevsky M.Yu., Khromova T.Y. Moving of continental ice and mass-balance of the Antarctic ice sheet. *Izmenenie okruzhayushchey sredy i klimata. Prirodnye i svyazannyye s nimi tekhnogennyye katastrofy*. Changing of environment and climate. Natural and technogenic catastrophes. V. 3. Pt. 2. *Prirodnye protsessy v polyarnykh oblastiakh Zemli*. Natural processes in polar regions of the Earth. Moscow: Institute of Geography RAS, 2009: 97–106. [In Russian].
 8. Kotlyakov V.M., Vasil'ev L.N., Moskalevsky M.Yu. Change of mass-balance of the Antarctic ice sheet over 50 years. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2011, 438 (2): 263–266. [In Russian].
 9. Moskalevsky M.Yu., Khromova T.Y. Dynamics of moving of continental ice in the East Antarctica over the second half of 20th century. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2008, 7 (41): 56–64. [In Russian].
 10. Giovinetto M.B., Bentley C.R. Surface balance in ice drainage systems in Antarctica. *Antarctic Journ. of the United States*. 1985, 20 (4): 6–13.
 11. Vaughan D.G., Bamber J.L., Giovinetto M.B., Russel J., Cooper A.P.R. Reassessment of net surface mass balance in Antarctica. *Journ. of Climate*. 1999, 12 (4): 933–946. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<0933:RO NSMB>2.0.CO;2.
 12. Giovinetto M.B., Zwally H.J. Spatial distribution of net surface accumulation on the Antarctic ice sheet. *Annals of Glaciology*. 2000, 31: 171–178. doi: 10.3189/172756400781820200.
 13. *Atlas Antarktiki*. Atlas of Antarctic. Moscow–Leningrad, 1966. V. 1: 225 p. [In Russian].
 14. *Atlas Antarktiki*. Atlas of Antarctic. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969. V. 2: 598 p. [In Russian].
 15. Bull C. Snow accumulation in Antarctica. [Contrib. № 156. Institute of Polar Studies, Ohio State University]. *Research in Antarctic*. Washington, D.C: American Association for the Advancement of Science, 1971: 367–421.
 16. Kotlyakov V.M., Barkov N.I., Loseva I.A., Petrov V.I. New map of nourishment of the Antarctic ice sheet. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1974, 24: 155–159. [In Russian].
 17. *World Atlas of Snow and Ice Resources*. Ed. V.M. Kotlyakov. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 392 p. [In Russian].
 18. Kotlyakov V.M. *Izbrannyye sochineniya*. Selected works. V. 1. *Glyatsiologiya Antarktity*. Glaciology of Antarctica. Moscow: Nauka, 2000: 431 p. [In Russian].
 19. Arthern R.J., Vaughan D.G., Rankin A.M., Mulvaney R., Thomas E.R. In situ measurements of Ant-

20. Zwally H.J., Giovinetto M.B., Jun L., Cornejo H.G., Beckley M.A., Brenner A.C., Saba J.L., Yi D. 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. doi: 10.3189/172756505781829007.
21. Rignot E., Bamber J.L., van den Broeke M.R., Davis C., Li Y., van de Berg W.J., van Meijgaard E. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modeling // *Nature Geoscience*. 2008. V. 1. № 2. P. 106–110. doi: 10.1038/ngeo102.
22. Mouginito J., Rignot E., Scheuchl B. Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013 // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. № 5. P. 1576–1584. doi: 10.1002/2013GL059069.
23. Sasgen I., Martinec Z., Fleming K. Regional ice-mass changes and glacial-isostatic adjustment in Antarctica from GRACE // *Earth Planetary Science Letters*. 2007. V. 264. № 3. P. 391–401. doi: 10.1016/j.epsl.2007.09.029.
24. Riva R.E.M., Gunter B.C., Urban T.J., Vermeersen B.L.A., Lindenbergh R.C., Helsen M.M., Bamber J.L., van de Wal R.S.W., van den Broeke M.R., Schutz B.E. Glacial isostatic adjustment over Antarctica from combined ICESat and GRACE satellite data // *Earth Planetary Science Letters*. 2009. V. 288. P. 516–523. doi: 10.1016/j.epsl.2009.10.013.
25. Horwath M., Dietrich R. Signal and error in mass change inferences from GRACE: the case of Antarctica // *Geophys. Journ. International*. 2009. V. 177. № 3. P. 849–864. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04139.x.
26. Van Wessem J.M., Reijmer C.H., Morlighem M., Mouginito J., Rignot E., Medley B., Joughin I., Wouters B., Depoorter M.A., Bamber J.L., Lenaerts J.T.M., De Van Berg W.J., Van Den Broeke M.R., Van Meijgaard E. Improved representation of East Antarctic surface mass balance in a regional atmospheric climate model // *Journ. of Glaciology*. 2014. V. 60. № 222. P. 761–770. doi: 10.3189/2014JoG14J051.
27. Lenaerts J.T.M., Van den Broeke M.R., Van de Berg W.J., Van Meijgaard E., Munneke P.K. A new, high-resolution surface mass balance map of Antarctica (1979–2010) based on regional atmospheric climate modeling // *Geophys. Research Letters*. 2012. V. 39. № 4: L04501. doi: 10.1029/2011GL050713.
28. Shepherd A., Ivins E.R., Geruo F., Barletta V.R., Bentley M.J., Bettadpur S., Briggs K.H., Bromwich D.H., Forsberg R., Galin N., Horwath M., Jacobs S., Joughin I., King M.A., Lenaerts J.T.M., Li J., Ligtenberg S.R.M., Luckman A., Luthcke S.B., McMillan M., Meister Rakia Mi.G., Mouginito J., Muir A., Nicolas J.P., Paden J., Payne A.J., Pritchard H., Rignot E., Rott H., Sørensen L.S., Scambos T.A., Scheuchl B., Schrama E.J.O., Smith B., Sundal A.V., van Angelen J.H., van de Berg W.J., van den Broeke M.R., Vaughan D.G., Velicogna I., Wahr J., Whitehouse L., Wingham D.J., Yi D., Young D., Zwally H.J. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance // *Science*. 2012. V. 338. № 6111. P. 1183–1189. doi: 10.1126/science.1228102.
29. Hanna E., Navarro F.J., Pattyn F., Domingues C.M., Fettweis X., Ivins E.R., Nicholls R.J., Ritz C., Smith B., Tulaczyk S., Whitehouse P.L., Zwally H.J. Ice-sheet arctic snow compaction compared with predictions of models. *Journ. of Geophys. Research*. 2010, 115 (F3): F03011. doi: 10.1029/2009JF001306.
20. Zwally H.J., Giovinetto M.B., Jun L., Cornejo H.G., Beckley M.A., Brenner A.C., Saba J.L., Yi D. Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992–2002. *Journ. of Glaciology*. 2005, 51 (175): 509–527. doi: 10.3189/172756505781829007.
21. Rignot E., Bamber J.L., van den Broeke M.R., Davis C., Li Y., van de Berg W.J., van Meijgaard E. Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modeling. *Nature Geoscience*. 2008, 1 (2): 106–110. doi: 10.1038/ngeo102.
22. Mouginito J., Rignot E., Scheuchl B. Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41 (5): 1576–1584. doi: 10.1002/2013GL059069.
23. Sasgen I., Martinec Z., Fleming K. Regional ice-mass changes and glacial-isostatic adjustment in Antarctica from GRACE. *Earth Planetary Science Letters*. 2007, 264 (3): 391–401. doi: 10.1016/j.epsl.2007.09.029.
24. Riva R.E.M., Gunter B.C., Urban T.J., Vermeersen B.L.A., Lindenbergh R.C., Helsen M.M., Bamber J.L., van de Wal R.S.W., van den Broeke M.R., Schutz B.E. Glacial isostatic adjustment over Antarctica from combined ICESat and GRACE satellite data. *Earth Planetary Science Letters*. 2009, 288: 516–523. doi: 10.1016/j.epsl.2009.10.013.
25. Horwath M., Dietrich R. Signal and error in mass change inferences from GRACE: the case of Antarctica. *Geophys. Journ. International*. 2009, 177 (3): 849–864. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04139.x.
26. Van Wessem J.M., Reijmer C.H., Morlighem M., Mouginito J., Rignot E., Medley B., Joughin I., Wouters B., Depoorter M.A., Bamber J.L., Lenaerts J.T.M., De Van Berg W.J., Van Den Broeke M.R., Van Meijgaard E. Improved representation of East Antarctic surface mass balance in a regional atmospheric climate model. *Journ. of Glaciology*. 2014, 60 (222): 761–770. doi: 10.3189/2014JoG14J051.
27. Lenaerts J.T.M., Van den Broeke M.R., Van de Berg W.J., Van Meijgaard E., Munneke P.K. A new, high-resolution surface mass balance map of Antarctica (1979–2010) based on regional atmospheric climate modeling. *Geophys. Research Letters*. 2012, 39 (4): L04501. doi: 10.1029/2011GL050713.
28. Shepherd A., Ivins E.R., Geruo F., Barletta V.R., Bentley M.J., Bettadpur S., Briggs K.H., Bromwich D.H., Forsberg R., Galin N., Horwath M., Jacobs S., Joughin I., King M.A., Lenaerts J.T.M., Li J., Ligtenberg S.R.M., Luckman A., Luthcke S.B., McMillan M., Meister Rakia Mi.G., Mouginito J., Muir A., Nicolas J.P., Paden J., Payne A.J., Pritchard H., Rignot E., Rott H., Sørensen L.S., Scambos T.A., Scheuchl B., Schrama E.J.O., Smith B., Sundal A.V., van Angelen J.H., van de Berg W.J., van den Broeke M.R., Vaughan D.G., Velicogna I., Wahr J., Whitehouse L., Wingham D.J., Yi D., Young D., Zwally H.J. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*. 2012, 338 (6111): 1183–1189. doi: 10.1126/science.1228102.
29. Hanna E., Navarro F.J., Pattyn F., Domingues C.M., Fettweis X., Ivins E.R., Nicholls R.J., Ritz C., Smith B., Tulaczyk S., Whitehouse P.L., Zwally H.J. Ice-sheet

- mass balance and climate change // *Nature*. 2013. V. 498. № 7452. P. 51–59. doi: 10.1038/nature12238.
30. *Sasgen I., Konrad H., Ivins E.R., Van den Broeke M.R., Bamber J.L., Martinec Z., Klemann V.* Antarctic ice-mass balance 2003 to 2012: regional reanalysis of GRACE satellite gravimetry measurements with improved estimate of glacial-isostatic adjustment based on GPS uplift rates // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 1499–1512. doi: 10.5194/tc-7-1499-2013.
 31. *King M.A., Bingham R.J., Moore P., Whitehouse P.L., Bentley M.J., Milne G.A.* Lower satellite-gravimetry estimates of Antarctic sea-level contribution // *Nature*. 2012. V. 491. P. 586–589. doi: 10.1038/nature11621.
 32. *Zwally J.H., Li J., Robbins J.W., Saba J.L., Yi D., Brenner A.C.* Mass gains of the Antarctic ice sheets exceeded losses // *Journ. of Glaciology*. 2015. V. 61. № 230. P. 1019–1036. doi: 10.3189/2015JoG15J071.
 33. *Harig C., Simons F.J.* Accelerated West Antarctic ice mass loss continues to outpace East Antarctic gains // *Earth Planetary Science Letters*. 2015. V. 415. P. 134–141. doi: 10.1016/j.epsl.2015.01.029.
 34. *Zammit-Mangion A., Rougier J.C., Bamber J.L., Schoen N.W.* Resolving the Antarctic contribution to sea-level rise: A hierarchical modelling framework // *Environmetrics*. 2014. V. 25. P. 245–264. doi: 10.1002/env.2247.
 35. *Martín-Español A., Zammit-Mangion A., Clarke P.J., Flament T., Helm V., King M.A., Luthcke S.B., Petrie E., Rémy F., Schön N., Wouters B., Bamber J.L.* Spatial and temporal Antarctic Ice Sheet mass trends, glacio-isostatic adjustment, and surface processes from a joint inversion of satellite altimeter, gravity, and GPS data // *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2016. V. 121. P. 182–200. doi: 10.1002/2015JF003550.
 36. *Barletta V.R., Sørensen L.S., Forsberg R.* Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica // *Cryosphere*. 2013. V. 7. № 5. P. 1411–1432. doi: 10.5194/tc-7-1411-2013.
 37. *Ivins E.R., Thomas S.J., Wahr J., Schrama E.O.J., Landerer F.W., Simon K.M.* Antarctic contribution to sea level rise observed by GRACE with improved GIA correction // *Journ. of Geophys. Research. Solid Earth*. 2013. V. 118. № 6. P. 3126–3141. doi: 10.1002/jgrb.50208.
 38. *Luthcke S.B., Sabaka T.J., Loomis B.D., Arendt A.A., McCarthy J.J., Camp J.* Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land-ice evolution from an iterated GRACE global mascon solution // *Journ. of Glaciology*. 2013. V. 59. № 216. P. 613–631. doi: 10.3189/2013JoG12J147.
 39. *Velicogna I., Wahr J.* Time variable gravity observations of ice sheet mass balance: precision and limitations of the GRACE satellite data // *Geophys. Research Letters*. 2013. V. 40. № 12. P. 3055–3063. doi: 10.1002/grl.50527.
 40. *Helm V., Humbert A., Miller H.* Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2 // *Cryosphere*. 2014. V. 8. P. 1539–1559. doi: 10.5194/tc-8-1539-2014.
 41. *McMillan M., Shepherd A., Sundal A., Briggs K., Muir A., Ridout A., Hogg A., Wingham D.* Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2 // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. P. 3899–3905. doi: 10.1002/2014GL060111.
 42. *Schrama E., Wouters B., Rietbroek R.* A mascon approach to assess ice sheet and glacier mass balances and their uncertainties from GRACE data // *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2016, 121: 182–200. doi: 10.1002/2015JF003550.
 30. *Sasgen I., Konrad H., Ivins E.R., Van den Broeke M.R., Bamber J.L., Martinec Z., Klemann V.* Antarctic ice-mass balance 2003 to 2012: regional reanalysis of GRACE satellite gravimetry measurements with improved estimate of glacial-isostatic adjustment based on GPS uplift rates. *The Cryosphere*. 2013, 7: 1499–1512. doi: 10.5194/tc-7-1499-2013.
 31. *King M.A., Bingham R.J., Moore P., Whitehouse P.L., Bentley M.J., Milne G.A.* Lower satellite-gravimetry estimates of Antarctic sea-level contribution. *Nature*. 2012, 491: 586–589. doi: 10.1038/nature11621.
 32. *Zwally J.H., Li J., Robbins J.W., Saba J.L., Yi D., Brenner A.C.* Mass gains of the Antarctic ice sheets exceeded losses. *Journ. of Glaciology*. 2015, 61 (230): 1019–1036. doi: 10.3189/2015JoG15J071.
 33. *Harig C., Simons F.J.* Accelerated West Antarctic ice mass loss continues to outpace East Antarctic gains. *Earth Planetary Science Letters*. 2015, 415: 134–141. doi: 10.1016/j.epsl.2015.01.029.
 34. *Zammit-Mangion A., Rougier J.C., Bamber J.L., Schoen N.W.* Resolving the Antarctic contribution to sea-level rise: A hierarchical modelling framework. *Environmetrics*. 2014, 25: 245–264. doi: 10.1002/env.2247.
 35. *Martín-Español A., Zammit-Mangion A., Clarke P.J., Flament T., Helm V., King M.A., Luthcke S.B., Petrie E., Rémy F., Schön N., Wouters B., Bamber J.L.* Spatial and temporal Antarctic Ice Sheet mass trends, glacio-isostatic adjustment, and surface processes from a joint inversion of satellite altimeter, gravity, and GPS data. *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2016, 121: 182–200. doi: 10.1002/2015JF003550.
 36. *Barletta V.R., Sørensen L.S., Forsberg R.* Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica. *Cryosphere*. 2013, 7 (5): 1411–1432. doi: 10.5194/tc-7-1411-2013.
 37. *Ivins E.R., Thomas S.J., Wahr J., Schrama E.O.J., Landerer F.W., Simon K.M.* Antarctic contribution to sea level rise observed by GRACE with improved GIA correction. *Journ. of Geophys. Research. Solid Earth*. 2013, 118 (6): 3126–3141. doi: 10.1002/jgrb.50208.
 38. *Luthcke S.B., Sabaka T.J., Loomis B.D., Arendt A.A., McCarthy J.J., Camp J.* Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land-ice evolution from an iterated GRACE global mascon solution. *Journ. of Glaciology*. 2013, 59 (216): 613–631. doi: 10.3189/2013JoG12J147.
 39. *Velicogna I., Wahr J.* Time variable gravity observations of ice sheet mass balance: precision and limitations of the GRACE satellite data. *Geophys. Research Letters*. 2013, 40 (12): 3055–3063. doi: 10.1002/grl.50527.
 40. *Helm V., Humbert A., Miller H.* Elevation and elevation change of Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2. *Cryosphere*. 2014, 8: 1539–1559. doi: 10.5194/tc-8-1539-2014.
 41. *McMillan M., Shepherd A., Sundal A., Briggs K., Muir A., Ridout A., Hogg A., Wingham D.* Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41: 3899–3905. doi: 10.1002/2014GL060111.
 42. *Schrama E., Wouters B., Rietbroek R.* A mascon approach to assess ice sheet and glacier mass balances and their uncertainties from GRACE data. *Journ. of Geophys. Research. Earth Surface*. 2016, 121: 182–200. doi: 10.1002/2015JF003550.

- of Geophys. Research. Solid Earth. 2014. V. 119. № 7. P. 6048–6066. doi: 10.1002/2013JB010923.
43. *Velicogna I., Sutterley T., van den Broeke M.R.* Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time variable gravity data // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. № 22. P. 8130–8137. doi: 10.1002/2014GL06105244.
 44. *Williams S., Moore P., King M.A., Whitehouse P.* Revisiting GRACE Antarctic ice mass trends and accelerations considering autocorrelation // *Earth Planetary Science Letters*. 2014. V. 385. P. 12–21. doi: 10.1016/j.epsl.2013.10.016.
 45. *Екайкин А.А., Владимирова Д.О., Липенков В.Я.* Вариации скорости снегонакопления в Центральной Антарктиде за последние 250 лет // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 1. С. 5–9.
 46. *Frezzotti M., Scarchilli C., Becagli S., Proposito M., Urbini S.* A synthesis of the Antarctic surface mass balance during the last 800 yr // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 303–319. doi: 10.5194/tc-7-303-2013.
 47. *Scambos T., Shuman C.* Comment on ‘Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses’ by H.J. Zwally and others // *Journ. of Glaciology*. 2016. V. 62. № 233. P. 599–603. doi: 10.1017/jog.2016.59.
 48. *Schröder L., Richter A., Fedorov D.V., Eberlein L., Brovko E.V., Popov S.V., Knöfel C., Horwath M., Dietrich R., Matveev A.Y., Scheinert M., Lukin V.* Validation of satellite altimetry by kinematic GNSS in central East Antarctica // *The Cryosphere Discussion*. 2017. in review. doi:10.5194/tc-2016-282.
 49. *Zwally J.H., Li J., Robbins J.W., Saba J.L., Yi D., Brenner A.C.* Response to Comment by T. SCAMBOS and C. SHUMAN (2016) on ‘Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses’ by H.J. Zwally and others (2015) // *Journ. of Glaciology*. 2016. V. 62. № 235. P. 990–992. doi: 10.1017/jog.2016.91.
 50. *Watkins M.M., Wiese D.N., Yuan D.-N., Boening C., Landerer F.W.* Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons // *Journ. of Geophys. Research. Solid Earth*. 2015. V. 120. P. 2648–2671. doi: 10.1002/2014JB011547.
 51. *Groh A., Horwath M.* The method of tailored sensitivity kernels for GRACE mass change estimates // *Geophys. Research Abstracts*. 2016. V. 18. EGU2016-12065.
 52. *Zwally H.J., Giovinetto M.B., Beckley M.A., Saba J.L.* Antarctic and Greenland Drainage Systems. GSFC Cryospheric Sciences Laboratory, 2012. http://icesat4.gsfc.nasa.gov/cryo_data/ant_grn_drainage_systems.php
 53. *Hay C.C., Morrow E., Kopp R.E., Mitrovica J.X.* Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise // *Nature*. 2015. V. 517. № 7535. P. 481–484. doi: 10.1038/nature14093.
 54. *Kopp R.E., Kemp A.C., Bittermann K., Horton B.P., Donnelly J.P., Gehrels W.R., Rahmstorf S.* Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era // *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2016. V. 113. № 11. P. E1434–E1441. doi: 10.1073/pnas.1517056113. <http://www.pnas.org/content/113/11/E1434.full>
 - Geophys. Research. Solid Earth. 2014, 119 (7): 6048–6066. doi: 10.1002/2013JB010923.
 43. *Velicogna I., Sutterley T., van den Broeke M.R.* Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time variable gravity data. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41 (22): 8130–8137. doi: 10.1002/2014GL06105244.
 44. *Williams S., Moore P., King M.A., Whitehouse P.* Revisiting GRACE Antarctic ice mass trends and accelerations considering autocorrelation. *Earth Planetary Science Letters*. 2014, 385: 12–21. doi: 10.1016/j.epsl.2013.10.016.
 45. *Ekaykin A.A., Vladimirova D.O., Lipenkov V.Ya.* Variations of snow accumulation rate in the Central Antarctica over the last 250 years. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (1): 5–9. [In Russian].
 46. *Frezzotti M., Scarchilli C., Becagli S., Proposito M., Urbini S.* A synthesis of the Antarctic surface mass balance during the last 800 yr. *The Cryosphere*. 2013, 7: 303–319. doi: 10.5194/tc-7-303-2013.
 47. *Scambos T., Shuman C.* Comment on ‘Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses’ by H.J. Zwally and others. *Journ. of Glaciology*. 2016, 62 (233): 599–603. doi: 10.1017/jog.2016.59.
 48. *Schröder L., Richter A., Fedorov D.V., Eberlein L., Brovko E.V., Popov S.V., Knöfel C., Horwath M., Dietrich R., Matveev A.Y., Scheinert M., Lukin V.* Validation of satellite altimetry by kinematic GNSS in central East Antarctica. *The Cryosphere Discussion*. 2017. in review. doi:10.5194/tc-2016-282.
 49. *Zwally J.H., Li J., Robbins J.W., Saba J.L., Yi D., Brenner A.C.* Response to Comment by T. SCAMBOS and C. SHUMAN (2016) on ‘Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses’ by H. J. Zwally and others (2015). *Journ. of Glaciology*. 2016, 62 (235): 990–992. doi: 10.1017/jog.2016.91.
 50. *Watkins M.M., Wiese D.N., Yuan D.-N., Boening C., Landerer F.W.* Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journ. of Geophys. Research. Solid Earth*. 2015, 120: 2648–2671. doi: 10.1002/2014JB011547.
 51. *Groh A., Horwath M.* The method of tailored sensitivity kernels for GRACE mass change estimates. *Geophys. Research Abstracts*. 2016, 18. EGU2016-12065.
 52. *Zwally H.J., Giovinetto M.B., Beckley M.A., Saba J.L.* Antarctic and Greenland Drainage Systems. GSFC Cryospheric Sciences Laboratory, 2012. http://icesat4.gsfc.nasa.gov/cryo_data/ant_grn_drainage_systems.php
 53. *Hay C.C., Morrow E., Kopp R.E., Mitrovica J.X.* Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature*. 2015, 517 (7535): 481–484. doi: 10.1038/nature14093.
 54. *Kopp R.E., Kemp A.C., Bittermann K., Horton B.P., Donnelly J.P., Gehrels W.R., Rahmstorf S.* Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proc. of the National Academy of Sciences*. 2016, 113 (11): E1434–E1441. doi: 10.1073/pnas.1517056113. <http://www.pnas.org/content/113/11/E1434.full>