

ISSN 0130-2906

# **МЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОЛОГИЯ**

**2013 № 2**

ФГБУ "Научно-исследовательский центр  
космической гидрометеорологии "Планета"

## Влияние лунно-солнечных приливов на айсберговый сток Антарктиды

В. Г. Захаров\*, Н. С. Сидоренков†

В результате многолетних наблюдений установлена регулярная вариация твердого стока ледникового покрова Антарктиды с периодом 18,6 года. Показано, что периодичность твердого стока коррелирует с 18,6-летней периодичностью вариации угловой скорости вращения Земли, вызванной 18,6-летней циклической изменчивости лунно-солнечных приливных сил. Выявлено, что наряду со многими собственно климатическими процессами отмечается вибрационное гравитационное смещение ледников в море из-за приливных колебаний. Айсберговый сток запаздывает по отношению к ходу дисперсии приливных колебаний угловой скорости примерно на 6 лет.

### Введение

Колебания плавающих частей (шельфовых и выводных) ледников Антарктиды связаны с особенностями изменений климата и гидрологии южно-полярной области. Выявлено, что смена чередующихся периодов наступания и отступления края антарктических ледников в результате облома айсбергов связана с периодической сменой меридиональной и зональной форм атмосферной циркуляции, интенсивностью циклонической деятельности, вариациями количества осадков и притока тепла. Реакция плавающих частей ледников на усиление циклонической деятельности и нагонов воды при воздействии на них барических волн циклонов выражается в ускорении движения ледников (подвижках) в сторону моря. Периоды колебаний края антарктических ледников отражают не только характер атмосферной циркуляции и условия снегонакопления в Антарктике, но и преобладающие многолетние тенденции в изменениях уровня моря как в отдельных районах, так и в целом по периферии ледникового покрова [И — 15].

В настоящей работе показана связь вариаций айсбергового стока Антарктиды с 18,6-летней циклической изменчивости лунно-солнечных приливных сил. Это открытие указывает на то, что айсберговый сток генерируется вибрационным перемещением ледников. Оно позволяет переосмыслить все найденные ранее связи динамики шельфовых и выводных ледников Антарктиды и ледниковых комплексов Арктики с особенностями изменений атмосферной циркуляции, климата и гидрологии полярных

\* Геологический институт Российской академии наук, e-mail: zakharov\_vg@mail.ru.

† Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, e-mail: sidorenkov@metcenter.ru.

### Изменчивость лунно-солнечных приливов

Лунная приливная сила колеблется во времени с периодом 13,65 сут. Она является функцией склонения и геоцентрического расстояния Луны, которые сложно изменяются во времени. Амплитуда месячных колебаний склонения Луны изменяется с периодом 18,61 года от 29 до 18° из-за регрессии узлов лунной орбиты. Перигей лунной орбиты движется с периодом 8,85 года. В итоге амплитуда колебаний приливных сил изменяется во времени с периодами 18,61, 8,85, 6,0, 1,0, 0,5 года, месячным, полумесячным и многими другими менее значимыми.

Изменчивость приливных сил наиболее заметна в колебаниях угловой скорости вращения Земли. В работах [19, 24] вычислен временной ряд приливных колебаний угловой скорости вращения Земли с 1901 по 2011 г. с суточной дискретностью. На рис. 1 приведен график этого ряда. Его анализ показывает, что амплитуда полумесячных колебаний сложно меняется. Верхняя огибающая кривая выписывает волны с периодом 18,6 года, а нижняя огибающая колеблется с периодом 4,4 года.

Удобной характеристикой изменчивости той или иной геофизической величины во времени является ее дисперсия, вычисленная в скользящем временном интервале (например, равном году). На рис. 2 представлен временной ход дисперсии  $D$  приливных колебаний скорости вращения Земли в скользящем годовом окне. Дисперсия  $D$  изменяется в три раза: от минимальной в 1903, 1923, 1942, 1960, 1978, 1997 гг. до максимальной в 1914, 1932, 1950, 1968, 1989, 2007 гг. [19]. Минимальной дисперсия  $D$  бывает при совпадении нисходящего узла лунной орбиты с точкой весеннего равноденствия, а максимальной — при совпадении с этой точкой восходящего узла лунной орбиты.

### Вибрационное перемещение ледников

Приливные деформации малы, но периодически повторяются и действуют постоянно. Они создают накапливающиеся эффекты, которые прояв-

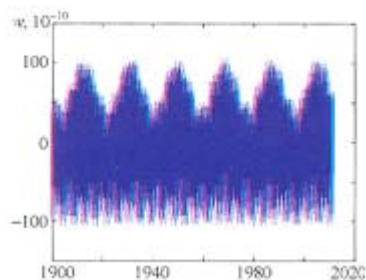


Рис. 1. Приливные колебания угловой скорости вращения Земли с 1901 по 2011 г.

По оси ординат отложены относительные отклонения угловой скорости  $v$  в  $1/\Gamma^2$ .

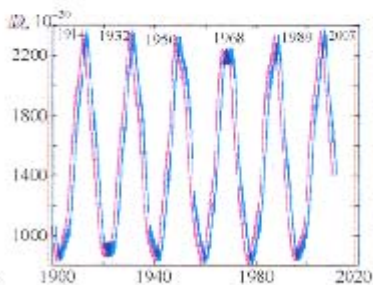


Рис. 2. Дисперсия приливных колебаний скорости вращения Земли  $D$  в скользящем годовом окне за период 1900–2010 гг.

ляются в трансформации вертикальных приливных смещений в горизонтальные смещения ледников. Во время отливов плавающие части антарктического ледникового покрова (шельфовые и выводные ледники) налегают на подледные поднятия дна, замедляя свое движение в сторону моря. При приливе и повышении уровня моря плавающие части ледников всплывают, отрываются от поднятий дна и, не испытывая силы трения о ложе, смещаются в сторону моря под действием горизонтального компонента силы давления масс льда из внутренних областей покрова. При последующем отливе плавающие части антарктических ледников снова задерживаются на поднятиях дна, а при приливе опять всплывают и ускоряют свое движение в сторону океана. При максимальном выдвигении ледников в море от их краевой части в определенный момент отделяются айсберги.

Такой характер движения, но уже применительно к механике, описан в работах И. И. Блехмана [5, 6, 21] и известен как "вибрационное перемещение". Он подтверждается полевыми наблюдениями за динамикой двух опорных ледников в Антарктиде и в Арктике. Так, в соответствии с данными гидропостов, расположенных рядом с ледниками, было установлено, что в периоды увеличения скорости движения их края действительно наблюдалось повышение уровня моря (до 40—60 см), а при замедлении — понижение [10, 11]. Механизм вибрационного перемещения, заключающийся в трансформации вертикальных приливных колебаний ледников в горизонтальные смещения их в сторону океанов, действует постоянно. Выше было показано, что амплитуда прилива изменяется во времени с периодом 18,6 года. Если механизм вибрационного перемещения ледников действует, то и айсберговый сток должен изменяться с этим циклом.

#### Айсберговый сток антарктического ледникового покрова

По данным работы [2], площадь находящихся на плаву плит шельфовых ледников достигает 1653 тыс. км<sup>2</sup>, что составляет 11,8% площади всей Антарктиды. Ранее было показано, что многочисленные и испытывающие значительные колебания плавающие языки выводных ледников составляют лишь 0,2% площади ледникового покрова, или 1,3—1,6% площади всех его плавающих частей. Таким образом, более чем на 98% площадь находящихся на плаву образований Антарктиды представлена шельфовыми ледниками [12].

В целом для Антарктиды все имеющиеся данные о горизонтальных перемещениях ледников (колебаниях края) представлены и проанализированы в работах [12, 13]. По описаниям, картам и космическим снимкам была исследована динамика 88 ледников, лежащих на периферии главных ледосборных бассейнов ледникового покрова, в их числе 34 шельфовых ледника (61% общего числа, или 91% общей площади известных шельфовых ледников Антарктиды) и 54 выводных ледника и ледяных потока. Общая протяженность анализируемой береговой линии составила 10 тыс. км, или 52% всей длины побережий шельфовых и выводных ледников.

Все собранные сведения о характере динамики и направленности колебаний фронтов ледников (ранние и современные карты, многократные космические фотоснимки) были сформированы в две отдельные группы

периодов времени. Первая группа объединяла данные о положении морских границ ледников при их максимальных и промежуточных продвижениях в сторону моря, вторая группа — при крайних южных и промежуточных отступлениях в сторону материка в результате обломов айсбергов. До настоящего времени выделено 10 периодов подвижек и отступаний края шельфовых и выводных ледников (два периода реконструированы вследствие малой обеспеченности историческими материалами). Последний период наступаний шельфовых и выводных ледников после обширных обломов айсбергов 1996—2009 гг., по-видимому, еще не закончен.

Для контроля анализ данных об изменениях положения края исследуемых ледников выполнялся два раза. Второй раз оценка колебаний края антарктических ледников производилась по опорным (репрезентативным) шельфовым и выводным ледникам, расположенным циркумполярно по периферии Антарктиды. Коэффициент корреляции полученных рядов оказался равным 0,96 [13].

Выделены следующие периоды колебаний края исследованных ледников: 1893—1902, 1902—1910 (с 1912 по 1934 г. данные отсутствуют), 1935—1939, 1947—1949, 1955—1957, 1958—1960, 1961 — 1965, 1970—1983, 1984—1988, 1989—1994 2001—2004, 2005—2009 гг. (Периоды максимального продвижения фронта плавающих частей ледников в сторону моря даны жирным шрифтом и подчеркнуты, промежуточные периоды наступаний отмечены только жирным шрифтом. Периоды крайних южных положений фронтов ледников при их отступании после облома айсбергов показаны обычным шрифтом.)

На основании всех полученных материалов была уточнена периодичность подвижек (сердечий) антарктических ледников с наращиванием площади и объема льда, а также резкого отступления края в результате отделения морских окончатий ледников в виде айсбергов.

В целом особенности динамики края антарктических ледников за исследованный период можно охарактеризовать следующим образом. Периоды наступаний (подвижек) ледников всегда тесно связаны с повышением уровня моря. Реакция плавающих частей ледников в этих условиях выражается в увеличении скорости их продвижения в сторону моря, что приводит к увеличению айсбергового стока. Периоды замедления темпов продвижения краев ледников в сторону моря и отступления фронтов антарктических ледников в результате облома айсбергов наблюдаются при понижении уровня моря у ледяных побережий [11, 13—15].

Все доступные данные о динамике и режиме шельфовых и выводных ледников Антарктиды с 1893 по 2009 г. были использованы для оценки айсбергового (твердого) стока с периферии ледникового покрова в целом. Необходимые сведения для этого (протяженность береговой линии каждого из типов ледяных побережий Антарктиды, годовые скорости их движения, толщина) вычленились из работ [1, 4, 7—9, 17, 18, 20, 22]. Хотя данные этих авторов были получены в основном по картам и аэрофотоснимкам 1947—1969 гг., они широко используются для расчетов водно-ледового баланса Антарктиды и в настоящее время.

В указанных выше работах протяженность разных типов ледяных побережий Антарктиды, скорость движения края и выбранная для расчетов толщина ледников и материкового льда различаются. Например, протя-

женность береговой линии в работе [20] оценивается как 30 030 км, а в расчетах расхода льда [17] принята протяженность периметра 27 610 км. В связи с этим есть различия и в расчетах водно-ледового баланса. Анализ показал, что наиболее оптимальными являются следующие соотношения ледяных берегов и побережий с выходами коренных пород: шельфовые ледники — 41,4%, материковый лед, или покровное спеденение — 37,4%, выводные ледники — 13,1%, коренные породы — 8,1%.

В периоды общего наступания шельфовых и выводных ледников Антарктиды (середней), по имеющимся данным, скорость продвижения их фронта может увеличиваться на 70—100% по отношению к скорости продвижения фронта ледников в периоды отступаний. Так, у одного из самых крупных шельфовых ледников Антарктиды — ледника Ронне — скорость продвижения фронта с 1947 по 1956 г. (подвижка) составляла 2200 м/год [7], а в 1980—1984 гг. (замедление движения накануне облома айсберга) — 1100 м/год [16]. Аналогичные данные имеются и для других шельфовых ледников. По расчетам авторов, скорость наступания фронта шельфового ледника Фильхнера в период наступания до 1986 г. составляла 2000—2500 м/год [12], а в 1986—2000 гг. после катастрофического облома трех крупных айсбергов (40 × (90—100) км) она не превышала 1000 м/год. Скорость продвижения фронта выводного ледника Ширазе в аналогичные периоды увеличивалась с 1800—2000 до 3150—3820 м/год [12, 23].

Указанные характеристики динамики края Антарктиды при прежних расчетах айсбергового стока не могли быть учтены, так как стали широко известны только в последние 15—20 лет.

Учитывая принятые в соответствии с работами [3, 4, 8, 9, 17, 18] средние взвешенные значения скорости движения недифференцированного края покрова 100 м/год, скорости движения края выводных ледников 600 м/год, толщины льда у края ~300 м, а также зная суммарную длину этих побережий, получаем среднюю величину айсбергового стока каждого из типов ледниковых окраин. Соответственно суммарная величина расхода льда этих побережий Антарктиды будет отражать расход льда из-за откалывания айсбергов (при плотности льда  $0,88 \text{ г/см}^3$ ).

В отличие от известных оценок айсбергового стока Антарктиды, авторы выделяют сток периодов активизации наступаний ледников (при середней) от стока в периоды замедления движения края ледников, обусловленных, как было установлено по результатам независимых исследований [25], приливными колебаниями скорости вращения Земли.

Полученные данные сравнивались с кривой дисперсии приливных колебаний скорости вращения Земли. Проведенный анализ кривых показал, что связь динамики плавающих частей Антарктиды с изменчивостью лунно-солнечных приливных колебаний отчетливо наблюдалась в 1893—1910 гг. (с 1911 г. до начала 1930-х годов данные отсутствуют), а с 1935 до 2009 г., т. е. в течение почти 75 лет, эта зависимость постоянно проявлялась (рис. 3).

В результате исследований было установлено, что периоды всеобщего наступания (середней) шельфовых и выводных ледников Антарктиды проявляются примерно через 6 лет после максимальной дисперсии  $D$  приливных колебаний скорости вращения Земли, а периоды повсеместного отступания края шельфовых и выводных ледников в результате обломов айс-

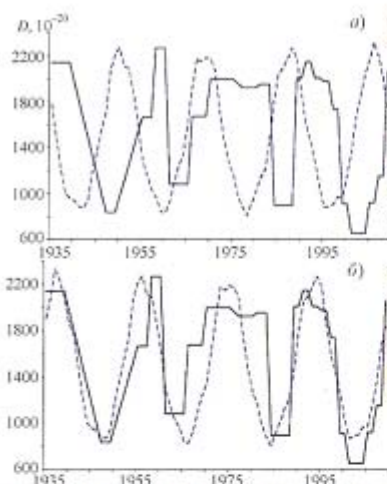


Рис. 3. Синхронный ход суммарного айсбергового стока льда с покрова Антарктиды (сплошная линия) и дисперсии  $D$  приливных колебаний скорости вращения Земли (штриховая линия) за период 1935—2009 гг. (а) и асинхронный ход тех же переменных с учетом запаздывания стока льда относительно дисперсии  $D$  на 6 лет.

Шкала времени для дисперсии  $D$  на рисунке б смещена вперед на 6 лет.

бергов — через 6 лет после минимумов дисперсии  $D$  (рис. 3).

Взаимный корреляционный анализ временных рядов полного твердого стока льда с ледникового покрова Антарктиды ( $\text{км}^3$  в год) и дисперсии приливных колебаний скорости вращения Земли за период 1935—2009 гг. (рис. 3) показал максимальную корреляцию, равную  $0,74 \pm 0,56$  при

сдвиге кривой  $D$  на 6 лет вперед. Айсберговый сток запаздывает по отношению к ходу дисперсии  $D$  на 6 лет, 18,6-летняя периодичность двух рассматриваемых процессов прослеживается надежно.

## Выводы

Можно констатировать, что лунно-солнечные приливы порождают вибрационные перемещения ледников Антарктиды в направлении океана и регулируют расход льда в результате айсбергового стока. Вариации суммарного айсбергового стока льда с антарктического ледникового покрова (край динамичных плавающих частей и малоподвижного материкового льда) в большей степени связаны с 18,6-летним циклом изменчивости лунно-солнечных приливных сил. Айсберговый сток запаздывает по отношению к ходу дисперсии  $D$  приливных колебаний на 6 лет.

Лунно-солнечные приливы влияют на атмосферные и океанические процессы [24]. Они являются тем внешним фактором, который, с одной стороны, генерирует вибрационное движение ледников и айсберговый сток, а с другой стороны, влияет на атмосферные и океанические процессы. Именно поэтому существуют многочисленные связи динамики шельфовых и выводных ледников Антарктиды с особенностями изменений атмосферной циркуляции, климата и гидрологии южно-полярной области.

1. Аверьянов В. Г. Морфометрические характеристики ледникового покрова Антарктиды. — Информационный бюллетень САЭ, 1980, № 100, с. 5—9.
2. Атлас океанов. Антарктика. — СПб: Главное управление навигации и океанографии, Министерство обороны Российской Федерации, 2005.
3. Бардин В. И., Суегова И. А. Периметр Антарктиды и бюджет антарктического ледникового покрова. / Антарктика. Доклады комиссии. 1964 г. — М., Наука, 1965.
4. Барков Н. И. Шельфовые ледники Антарктиды. — Л., Гидрометеоиздат, 1971, 226 с.
5. Блехман И. И. Вибрационная механика. — М., Физматлит, 1994, 400 с.
6. Блехман И. И. Вибрации "изменяет законы механики". — Природа, 2003, № 11, с. 42—53.
7. Буйницкий В. Х. Морские льды и айсберги Антарктиды. — Д., Изд-во ЛГУ, 1973, 255 с.
8. Долгушин Л. Д. Скорости движения ледников Антарктиды по повторным аэрофотосъемкам и морфологическим признакам. — Гляциологические исследования, 1963, № 9, с. 164—178.
9. Долгушин Л. Д., Евтеев С. А., Котляков В. М. О современной эволюции Антарктического ледникового покрова. — Гляциологические исследования, 1964, № 10, с. 132—140.
10. Жидков В. А., Захаров В. Г. Результаты мониторинга пульсирующего ледника Фриггоф (о. Западный Шпицберген) за период с 1996 по 2006 гг. — М., Геос, 2009, вып. 9, с. 256—265.
11. Захаров В. Г. Динамика впадения ледника Дюк и гидрометеорологические условия в заливе Прюдс (Восточная Антарктида) в 1989/1990 и 1994 гг. — Материалы гляциологических исследований, 2002, вып. 93, с. 169—180.
12. Захаров В. Г. Колебания ледников Антарктиды. — М., Аккоринформиздат, 1994, 128 с.
13. Захаров В. Г. Оценка общих тенденций колебаний шельфовых и выводных ледников Антарктиды за последние 100 лет. — Материалы гляциологических исследований, 2001, вып. 90, с. 139—151.
14. Клинге Р. К., Захаров В. Г. Изменения снежно-ледового режима Антарктиды. В сб.: Современные глобальные изменения природной среды. — М., Научный мир, 2006, с. 577—605.
15. Клинге Р. К., Захаров В. Г. Связь изменений уровня Мирового океана и динамики краевой части Антарктиды в историческое время. / В сб.: Арктика и Антарктика. Доклады комиссии. — М., 2002, № 35 (1), с. 60—70.
16. Кожен Х., Ланге М. Изучение баланса массы во фронтальной зоне шельфового ледника Фильхнера — Ронне в Антарктиде. — Материалы гляциологических исследований, 1986, вып. 57, с. 136—139.
17. Короткович Е. С., Котляков В. М., Сток. Водный баланс. / В кн.: Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Антарктида. — Л., Гидрометеоиздат, 1974, с. 470—474.
18. Котляков В. М., Лосев К. С., Лосева И. А. Ледовый баланс Антарктиды. — Известия АН СССР. Сер. География, 1977, № 1, с. 19—53.
19. Сидоренков Н. С. Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы. — Природа, 2008, № 2, с. 23—31.
20. Суегова И. А. Основные морфометрические характеристики Антарктиды. Гляциология. IX раздел программы МГУ. — М., Наука, 1968, 71 с.
21. Blekhan I. I. Vibrational mechanics. In: Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications. — Singapore, WorldScientific, 2000.
22. Loewe E. The water budget in Antarctica. In: JARE Scientific Reports. — Tokyo, Department of Polar Research, 1967, Special Issue, No. 1, pp. 101—110.
23. Nakamura K., Doi K., and Shinya K. Why is Shirase Glacier turning its flow direction eastward? — Polar Science, National Institute of Polar Research, Japan, Issue 2-4, December 2007, vol. 1, pp. 63—71.
24. Sidorenkov N. S. The Interaction between Earth's Rotation and Geophysical Processes. — Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, 317 p.
25. Zakharov V. G. and Sidorenkov N. S. The bisolar tide generates icebergs runoff. In: IPY Oslo Sciences Conference. Programm and Abstracts, 2010, pp. 1157—1158.