

УДК 551.345

СОВРЕМЕННОЕ УСКОРЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЛЕДНИКОВ АНТАРКТИДЫ НА ФОНЕ ВЫСОКОГО ПОДЛЕДНОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

© 2024 г. Академик РАН Л. И. Лобковский¹, А. А. Баранов^{2,*}, М. М. Рамазанов³

Поступило 04.10.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принято к публикации 14.11.2023 г.

Высокий тепловой поток и вулканическая активность в Западной Антарктиде способствуют неустойчивости и ускорению стока в океан покровных ледников Западно-антарктического ледового щита. При этом может произойти катастрофическое повышение уровня моря на десятки сантиметров – первые метры за очень короткое по геологическим масштабам время (годы-десятилетия) за счет быстрого сползания больших масс льда Западной Антарктиды в океан. В случае сползания ледников Пайн-Айленд (50 см – повышение уровня моря) или Туэйтс (65 см – повышение уровня моря) в океан купол Западно-Антарктического ледяного щита потеряет опору со стороны этих ледников и может начать разрушаться. В этом случае уровень моря поднимется уже на первые метры. На основе реологического закона Глена для двумерной модели движения льда как нелинейной вязкой жидкости рассчитаны скорости течения ледника толщиной 3000 м в условиях прилипания к ложу (~20 м/год) и в условиях скольжения по коренному основанию при подплавлении нижней кромки ледника за счет повышенного теплового потока снизу (~3000 м/год). Эти скорости хорошо согласуются со скоростями движения ледников Пайн-Айленд, Туэйтс, Амери, Денмен и Тоттен. Быстрое движение некоторых выводных ледников Восточной Антарктиды, вероятно, также вызвано подплавлением их подошвы, что дает основание предположить повышенный подледный тепловой поток в этих районах Восточной Антарктиды.

Ключевые слова: Антарктида, подледный вулканизм, тепловой поток, Туэйтс, повышение уровня моря

DOI: 10.31857/S2686739724030203

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные геологические и геодинамические процессы в Земле происходят очень медленно на временах порядка миллионов, десятков и сотен миллионов лет. Между тем современное глобальное потепление климата происходит в совершенно другом временном диапазоне, характеризующимся десятками лет. При этом полярные области Земли испытывают наиболее заметное и резкое потепление. В Арктике уменьшается

площадь морского льда, на мелководном российском шельфе наблюдается интенсивная эмиссия метана, происходит деградация в вечной мерзлоте на суше [1]. В Антарктиде в последнее время также уменьшается площадь морского льда и происходит ускоренное разрушение шельфовых ледников [2], а покровные ледники увеличивают скорость стекания в океан [3].

Все эти процессы обладают положительной обратной связью с потеплением климата, так как лед и снег хорошо отражают солнечные лучи, а метан в атмосфере обладает сильным парниковым эффектом [4]. Сам процесс таяния больших масс льда из-за тепловых изменений происходит достаточно медленно, занимая столетия и даже тысячелетия, приводя к медленному повышению уровня моря (миллиметры за год), что дает возможность человечеству время для маневра и адаптации. Между тем теоретически возможен сценарий быстрого повышения уровня моря

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова
Российской Академии наук, Москва, Россия.

²Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской Академии наук,
Москва, Россия

³Институт проблем геотермии и возобновляемой
энергетики – филиал Объединенного Института Высоких
Температур Российской Академии наук, Махачкала, Россия
*E-mail: aabaranov@gmail.com

за очень короткое время при ускоренном режиме сползания больших масс покровных ледников Антарктиды в море (ледовый оползень). Это может привести к быстрому катастрофическому поднятию уровня моря на десятки сантиметров и даже первые метры с затоплением огромных площадей суши и вызвать мощное цунами. Некоторым аналогом такого сползания был сход ледника Колка — катастрофа, произошедшая 20 сентября 2002 года в Кармадонском ущелье в Северной Осетии. Во многом катастрофа 2002 года стала неожиданностью для специалистов и органов власти, которые, памятуя о подвижке 33-летней давности, предполагали плавное и замедленное движение ледника, не сопровождающееся разрушительными последствиями. Однако скорость ледово-грязекаменного потока достигала 150–200 км/час. При этом размеры ледника Колка на порядки меньше покровных ледников Антарктиды.

Наблюдаемое в последние годы интенсивное разрушение ледников в Антарктике представляет серьезную опасность и является вызовом для цивилизации, поскольку потенциально может привести к подъему уровня Мирового океана на несколько десятков сантиметров уже в 21 веке. Причем не за счет медленного таяния ледников, а в результате быстрого сползания больших масс льда с коренного ложа в океан. В этом случае произойдет вытеснение огромного количества воды, сопровождаемое глобальным повышением уровня моря. Наиболее опасными считаются ледники Туэйтс и Пайн-Айленд. Их потенциальный вклад в глобальное повышение уровня моря составляет около 65 и 50 см соответственно.

В настоящей работе рассмотрена двумерная модель стекания покровного ледника в океан и даются оценки скоростей движения льда при различных граничных условиях, отвечающих прилипанию ледника к коренному ложу или скольжению его подошвы вдоль основания при подплавлении льда вследствие повышенного теплового потока.

ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА И ДВИЖЕНИЕ ЛЬДА В АНТАРКТИДЕ

Антарктический ледяной щит — один из двух полярных ледяных щитов Земли. Он охватывает около 98% площади Антарктиды и является самым крупным скоплением льда на Земле. Его площадь составляет 14 млн км², а объем ~26.5 млн км³ льда. В Антарктическом ледяном щите содержится около 61% всей пресной воды

на Земле, что эквивалентно ~58 м уровня Мирового океана [5]. Динамика движения и таяния ледников Антарктиды определяется множеством факторов: рельефом, реологией, температурой коренного ложа, граничными условиями сбоку, сверху и т.д.

Антарктида состоит из двух тектонически различных областей, разделенных Трансантарктическими горами. Западная Антарктида характеризуется утоненной корой и литосферой, обширными осадочными бассейнами и горячей верхней мантией [6, 7].

Для Западно-антарктической рифтовой системы характерен повышенный тепловой поток [8], в этой области обнаружено более 100 вулканов, в своем большинстве подледных [9], коренные породы находятся, в основном, ниже уровня моря (рис. 1).

Восточная Антарктида ранее считалась стабильным континентальным тектоническим блоком, и тепловой поток на нижней границе льда предполагался относительно низким [8]. Однако было показано, что рифтогенез и вулканическая активность происходили в Восточной Антарктиде в кайнозое и, возможно, продолжают в настоящее время [10–14]. Вулкан Гауссберг на побережье Земли Принцессы Елизаветы имеет плейстоценовый возраст [15].

Антарктический лед распространяется из центра материка к периферии покрова. В разных его частях это движение происходит с разной скоростью. В центре Антарктиды лед движется медленно, у ледникового края его скорости возрастают до нескольких десятков и сотен метров в год. Здесь быстрее всего движутся ледяные потоки, которые погружаются в открытый океан. Их скорости нередко достигают километра в год и более. Однако большинство ледяных потоков впадают не в океан, а в шельфовые ледники. Ледяные потоки такой категории движутся медленнее. Это объясняется сопротивлением со стороны шельфовых ледников, которые сами, как правило, тормозятся берегами и отмелями.

На рис. 1 цифрами обозначены наиболее быстро стекающие покровные ледники и их потенциальный вклад в повышение уровня моря: Пайн-Айленд (50 см), Туэйтс (65 см), Амери (777 см), Денмен (149 см); Тоттен (385 см), Уилкса (158 см). Основные потери льда в последние десятилетия ассоциируются именно с этими ледниками [3].

Основной сток льда центральной и наиболее возвышенной части ледяного щита Западной Антарктиды происходит по четырем

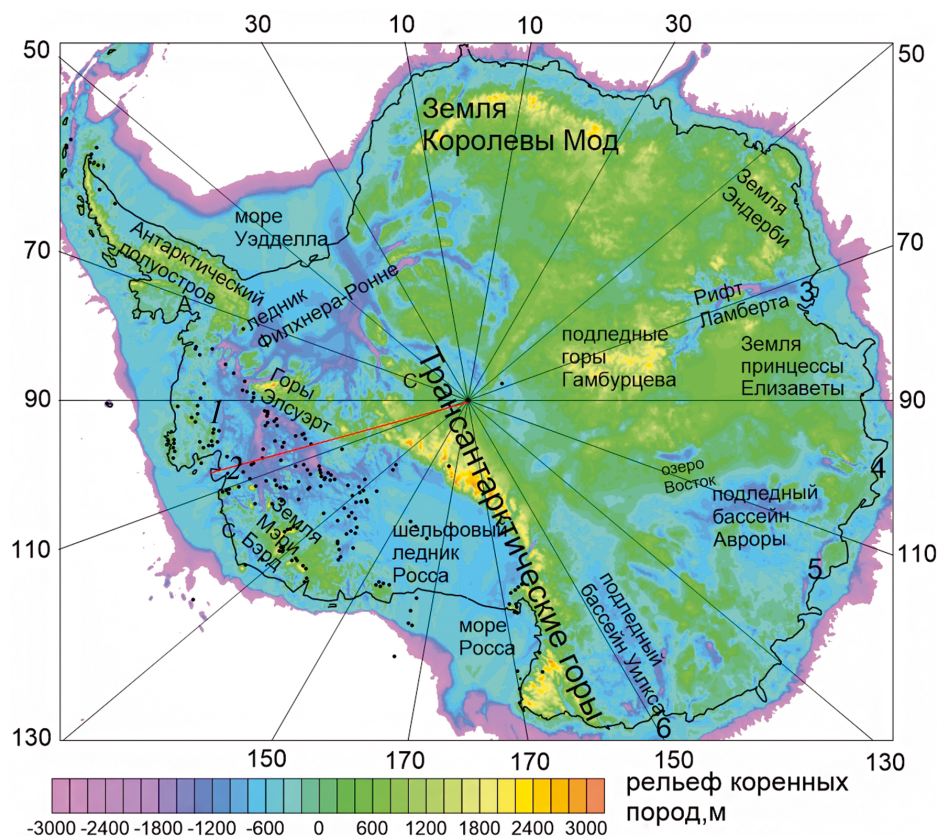


Рис. 1. Рельеф коренных пород Антарктиды по модели BEDMACHINE [5]. Красная линия — профиль от Южного Полюса до ледника Туэйтса. Вулканы отмечены черными точками. Цифрами отмечены быстродвижущиеся ледники: 1 — Пайн-Айленд; 2 — Туэйтс; 3 — Амеры; 4 — Скотт и Денмен; 5 — Вендерфорт и Тоттен; 6 — Уилкса.

направлениям: в сторону ледников Филхнера-Ронне, Росса, Пайн-Айленд и Туэйтс (рис. 1). Для первых двух покровный лед центральной части Западной Антарктиды стекает широким фронтом в шельфовые ледники, тогда как для ледников Пайн-Айленд и Туэйтс шельфовая часть практически отсутствует. Основные опасения вызывают ледники Пайн-Айленд и Туэйтс — скорости их выводных участков в последнее время увеличились в разы и составляют километры в год относительно их границ заземления, которые отступили вглубь континента. Для ледника Пайн-Айленд найден подледный вулканический источник тепла [16]. Повышенный геотермальный поток также обнаружен для ледника Туэйтс [17]. Для Восточной Антарктиды скорости некоторых выводных ледников, стекающих по узким подледным депрессиям, также велики. Для них, как и для ледников Пайн-Айленд и Туэйтс, скорости стекания увеличились в последние десятилетия [3].

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЕДНИКА ПО КОРЕННОМУ ЛОЖУ

Оценка скорости стекания ледовой массы по коренному ложу в океан проводится на основе двумерной модели движения покровного ледника как нелинейно вязкой жидкости вдоль профиля от гор Элсуэрт до границы ледника Туэйтс (рис. 2). Следует отметить важную особенность данного профиля. При подходе к берегу подледный рельеф коренных пород резко выполаживается. Объяснение этого феномена Антарктиды связано с позднекайнозойской активизацией рифтогенеза уже после оледенения континента [10]. Уникальность ситуации для ледяного континента заключается в том, что после оледенения происходит прекращение осадконакопления. Продолжение рифтогенеза в этих условиях приводит к формированию глубоких подледных впадин, заполненных льдом. У берега же происходит периодическая регрессия-трансгрессия моря. В период таяния льда возобновляется осадконакопление, а внутри континента этого не происходит. Поднятие дна при подходе к берегу тормозит

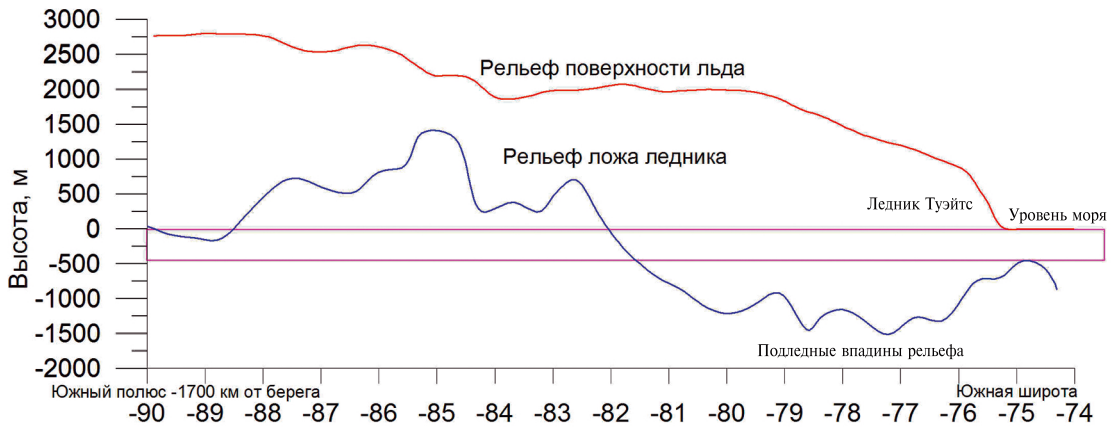


Рис. 2. Профили коренной породы и топографии льда от Южного Полюса до береговой линии ледника Туэйтс.

стекание ледника, поэтому при отступлении зоны заземления вглубь континента сечение стока будет увеличиваться и движение льда ускоряться. Таким образом при отступлении ледника возникает положительная обратная связь. Эта особенность характерна для наиболее нестабильных и быстро стекающих ледников 1–6 (рис. 1).

ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЛЕДНИКА

Уравнения двумерного движения вязкой среды с реологией Глена при $n = 3$ можно записать в виде [18]:

$$\begin{aligned} 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho_i g &= 0 \quad (1) \\ \eta &= \frac{A^{-1/3}}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{-1/3}. \end{aligned}$$

При условии прилипания ледника к подошве из второго уравнения системы (1) получим оценку:

$$p \sim \rho_i g z_s, \quad (2)$$

где z_s – рельеф ледника.

Используя (2), запишем первое уравнение (1) в виде

$$2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \sim \rho_i g \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} + \frac{\partial z_b}{\partial x} \right), \quad (3)$$

где z_b – рельеф пород под ледником.

Будем полагать, что высота ледника много меньше его длины

$$h \ll L. \quad (4)$$

В случае условия прилипания в уравнении (3) первый член относится ко второму как $(h/L)^2 \ll 1$.

Поэтому величину скорости ледника в случае условия прилипания можно оценить, сравнивая по порядку величины второй и третий члены. В итоге с учетом реологии получим [19]:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{1/3} &\sim A^{1/3} \rho_i g h \frac{\partial (z_s + z_b)}{\partial x} \Rightarrow \\ \Rightarrow u &\sim Ah \left(\rho_i g h \frac{z_s + z_b + z_{\min}}{L} \right) \sim Ah \left(\rho_i g h \frac{h}{L} \right)^3, \quad (5) \\ u &\sim Ah \left(\rho_i g h \frac{h}{L} \right)^3. \end{aligned}$$

Для A возьмем выражение из работы [18]

$$A = \begin{cases} E_f \cdot 5.47 \cdot 10^{10} \exp \left(\frac{-13.9 \cdot 10^4}{RT} \right), & T \gg 263.15 K, \\ E_f \cdot 1.14 \cdot 10^{-5} \exp \left(\frac{-6.0 \cdot 10^4}{RT} \right), & T \ll 263.15 K. \end{cases} \quad (6)$$

Для условия скольжения можно получить оценку:

$$u \sim \frac{3 + h\gamma}{h\gamma} Ah \left(\rho_i g h \frac{z_s + z_b - z_{\min}}{L} \right)^3. \quad (7)$$

Здесь γ – коэффициент, характеризующий трение, который определяется из граничного условия проскальзывания на подошве ледника:

$$z=0: \frac{\partial u}{\partial z} = \gamma u. \quad (8)$$

Из (7) при $\gamma \rightarrow \infty$ получим условие прилипания. С уменьшением γ , как следует из (7), скорость монотонно растет.

Предположим, что имеет место Кулоновский закон трения, тогда

$$\eta \frac{u}{h} \sim F_{tr} \sim \mu(\rho_i gh - p_w). \quad (9)$$

Здесь μ — коэффициент трения; p_w — давление.

Согласно работе [18], можно положить

$$p_w = 0.96 \rho_i gh. \quad (10)$$

Используя (7), (9) и выражение для вязкости (1), можно получить оценку

$$\gamma \sim 5 \frac{10^4}{h\mu^3} \left(\frac{h}{L} \right)^3. \quad (11)$$

При данном значении γ будем иметь следующую оценку скорости

$$u \sim \frac{3+h\gamma}{h\gamma} Ah \left(\rho gh \frac{h}{L} \right)^3, \gamma \sim 5 \frac{10^4}{h\mu^3} \left(\frac{h}{L} \right)^3. \quad (12)$$

Таким образом, при известном γ выражение (7) дает оценку скоростей ледника в случае проскальзывания. Если принять, что трение определяется законом Кулона и справедливо (10), то для γ получим оценку (11) и из (7) имеем

$$u \sim \frac{3+h\gamma}{h\gamma} Ah \left(\rho gh \frac{h}{L} \right)^3.$$

Рассмотрим следующие значения параметров, исходя из рис. 1. $L \sim 8 \cdot 10^5$ м, $\rho_i \approx 900$ кг/м³, $T = 263$ К, $E_f = 1$, $\mu = 0.5$. Значение $\mu = 0.5$ взято из работы [20].

Для $h = 3000$ м при прилипании рассчитанная скорость ледника составляет ~ 23 м/год, при скольжении около 3000 м/год.

Приведенная теоретическая модель показывает, как растекается громадная масса льда толщиной более 2 км в гравитационной линзе центральной части Западной Антарктиды, выдавливаясь через узкое выводное “горло” толщиной около 500 м море. По мере отступления ледника Туэйтс выводное “горло” будет увеличиваться, т.к. рельеф коренных пород углубляется и таким образом стекание льда может ускоряться. Скорости ледника равны десяткам метров в год в случае прилипания к ложу ледника и достигают километров в год в условиях скольжения. В настоящее время для ледников Туэйтса и Пайн-Айленд характерны преимущественно условия скольжения на нижней границе со скоростью течения

льда километры в год. Модели других исследователей дают аналогичные скорости для ледников Туэйтса и Пайн-Айленд, предполагая условие скольжения на ложе ледника [21].

Как отмечалось выше, основным фактором, способствующим скольжению ледникового покрова, является увеличение теплового потока в Западной Антарктиде, что создает возможность таяния льда у подножия ледника. Скольжение на нижней границе ледника может привести к быстрому сползанию ледников Туэйтс и Пайн-Айленд в море, что откроет путь к быстрому гравитационному растеканию ледяной массы центральной части Западной Антарктиды по долинам ледников Туэйтса и Пайн-Айленд и, как следствие, к быстрому подъему уровня моря за короткий период времени.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные выше характерные скорости движения покровных ледников качественно согласуются с наблюдаемыми данными. Повышенный тепловой поток и вулканизм под Западно-антарктической рифтовой системой способствуют подплавлению подошвы ледяного щита Западной Антарктиды, что облегчает скольжение льда из внутренних областей Западной Антарктиды в море по коренному основанию. Это может привести к быстрому сползанию громадных масс покровных ледников в море (например, ледник Туэйтс) и глобальному повышению уровня Мирового океана на несколько десятков сантиметров и даже первые метры. Аналогичный механизм с ускорением стока возможно работает и для части Восточно-антарктического ледового щита, в частности, для ледников Амери, Тоттена и Денмана, стекающих по глубоким впадинам ложа в океан с большой скоростью и дающих наибольшие потери льда для Восточной Антарктиды. Подледные впадины, по которым стекают эти ледники являются элементами кайнозойской, Восточно-антарктической рифтовой системы с повышенным тепловым потоком и возможным подледным вулканизмом [22]. Отступление этих ледников вглубь континента с понижением дна коренного ложа приведет к ускорению движения льда в океан из-за ретроградных наклонов ложа этих ледников.

Представленная модель динамики ледников требует дальнейших уточнений. В частности, в нашей модели не учтена трехмерность модели растекания ледового щита. Необходимы более точные расчеты динамики ледников с учетом их трехмерной геометрии, реологии льда и ложа ледника.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена частично в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004, частично в рамках госзадания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН № АААА-А19-119011490131-3 и частично в рамках госзадания Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиала ОИВТ РАН № 121121700223-8.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lobkovsky L.I. Seismogenic-triggering mechanism of gas emission activations on the Arctic shelf and associated phases of abrupt warming // *Geosciences*. 2020. V. 10. P. 428.
2. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Semiletov I.P., Alekseev D.A. Trigger Mechanisms of Gas Hydrate Decomposition, Methane Emissions, and Glacier Breakups in Polar Regions as a Result of Tectonic Wave Deformation // *Geosciences*. 2022. V. 12. P. 372.
3. Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B., van den Broeke M., van Wessem M.J., Morlighem M. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017 // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2019. V. 116. P. 1095–1103.
4. Ruppel C.D., Kessler J.D. The interaction of climate change and methane hydrates // *Rev. Geophys.* 2017. V. 55. P. 126–168.
5. Morlighem M., Rignot E., Binder T., Blankenship D., Drews R., Eagles G., Eisen O., Ferraccioli F., Forsberg R., Fretwell P., et al. Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // *Nat. Geosci.* 2020. V. P. 13, 132–137.
6. Baranov A., Morelli A. The structure of sedimentary basins of Antarctica and a new three-layer sediment model // *Tectonophysics*. 2023. V. 846. P. 299–313.
7. Баранов А.А., Лобковский Л.И., Бобров А.М. Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды // *Доклады Академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 512. № 1. С. 100–105.
8. Löising M., Ebbing J., Szwillus W. Geothermal heat flux in Antarctica: Assessing models and observations by Bayesian inversion // *Front. Earth Sci.* 2020. V. 8. P. 105.
9. van Wyk de Vries M., Bingham R., Hein A. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica // *Geol. Soc. Spec. Publ.* 2018. V. 461. P. 231.
10. Баранов А.А., Лобковский Л.И. Глубочайшие впадины на суше в Антарктиде как результат кайнозойской активизации рифтогенеза // *Доклады Академии наук. Науки о Земле*. 2024. Т. 514. № 1. С. 50–55.
11. Голынский Д.А., Голынский А.В. Рифтовые системы Восточной Антарктиды — ключ к пониманию распада Гондваны // *Региональная геология и металлогения*. 2012. № 52. С. 58–72.
12. Голынский А.В., Голынский Д.А. Рифтовые системы в тектонической структуре Восточной Антарктиды // *Научные результаты российских геолого-геофизических исследований в Антарктике*. Вып. 2. СПб. 2009. С. 132–162.
13. Масолов В.Н., Куринин Р.Г., Грикуров Г.Э. Глубинное строение рифтовых зон Антарктики и их роль в тектонической структуре земной коры // *25 лет Советской антарктической экспедиции*. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. С. 16–29.
14. Каменев Е.Н., Лейченко Г.Л. Структурная карта Антарктики м-ба 1:25 500 000 с объяснительной запиской. Геолого-минералогическая карта Мира м-ба 1:30 000 000 (Ред. Красный Л.И. и др.). СПб: ВСЕГЕИ, 2000.
15. Суцеская Н.М., Мигдисова Н.А., Антонов А.В., Крымский Р.Ш., Беляцкий Б.В., Кузьмин Д.В., Бычкова Я.В. Геохимические особенности лампроитовых лав четвертичного вулкана Гауссберг (Восточная Антарктида) — результат влияния мантийного плюма Кергелен // *Геохимия*. 2014. № 12. С. 1–21.
16. Loose B., Naveira Garabato A.C., Schlosser P., Jenkins W.J., Vaughan D., Heywood K.J. Evidence of an active volcanic heat source beneath the Pine Island Glacier // *Nat. Commun.* 2018. V. 9. P. 2431.
17. Dziadek R., Ferraccioli F., Gohl K. High geothermal heat flow beneath Thwaites Glacier in West Antarctica inferred from aeromagnetic data // *Communication Earth Environment*. 2021. V. 2 P. 162.
18. Pattyn F. Sea-level response to melting of Antarctic ice shelves on multi-centennial timescales with the fast Elementary Thermomechanical Ice Sheet model (f.ETISH v1.0) // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. P. 1851–1878.
19. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Garagash I.A., Ramazanov M.M., Vladimirova I.S., Gabsatarov Y.V., Alekseev D.A., Semiletov I.P. Large Earthquakes in Subduction Zones around the Polar Regions as a Possible Reason for Rapid Climate Warming in the Arctic and Glacier Collapse in West Antarctica // *Geosciences*. 2023. V. 13. P. 171.
20. Енифанов В.П. Физическое моделирование режимов движения ледников // *Лед и Снег*. 2016. Т. 56. № 3. С. 333–344.
21. Feldmann J., Levermann A. Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2015. V. 112. P. 14191–14196.
22. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимиров И.С., Алексеев Д.А. Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике и разрушения ледников в Антарктике // *Вестник РАН*. 2023. Т. 93. № 6. С. 526–538.

ACCELERATION OF ANTARCTICA GLACIERS AT HIGH SUBGLACIAL HEAT FLOW

Academician of the RAS **L. I. Lobkovsky^a, A. A. Baranov^{b,#}, M. M. Ramazanov^c**

^a*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c*Geothermal Research and Renewable Energy – Branch of Joint Institute for High Temperatures
of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation*

[#]*E-mail: aabaranov@gmail.com*

High subglacial heat flow and volcanic activity in West Antarctica contribute to instability and accelerated flow into the ocean of the West Antarctic ice sheet. In this case, a catastrophic rise in sea level by tens of centimeters – the first meters can occur in a very short geological time (years-decades) due to the rapid sliding of large masses of ice in West Antarctica into the ocean. If the Pine Island (50 cm sea level rise) or Thwaites (65 cm sea level rise) glaciers slide into the ocean, the West Antarctic Ice Sheet will lose support from these glaciers and may begin to collapse. In this case, the sea level will rise by a few meters. Based on Glen's rheological law for a two-dimensional model of the movement of ice as a nonlinear viscous fluid, the flow velocities of a 3000 m thick glacier were calculated under conditions of adhesion to the bed (~ 20 m/year) and under conditions of sliding along the bedrock when the lower edge of the glacier melts due to increased heat flow from below (~ 3000 m/year). These velocities are in good agreement with the velocities of the Pine Island, Thwaites, Amery, Denman and Totten glaciers. The rapid movement of some outlet glaciers in East Antarctica is also likely caused by melting of their bases, suggesting increased subglacial heat flow in these areas of East Antarctica.

Keywords: Antarctica, subglacial volcanism, heat flow, Thwaites Glacier, sea level rise