

## Моделирование геомеханических процессов взаимодействия ледяного покрова с подледниковым озером Восток — Антарктида

В.С. ЛИТВИНЕНКО, В.Л. ТРУШКО ✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106 Санкт-Петербург, Россия

✉ rectorat@spmi.ru

**Ссылка для цитирования оригинальной статьи:** Litvinenko V, Trushko V (2025). Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica. *Antarctic Science* 37, 39–48. <https://doi.org/10.1017/S0954102024000506>.

**Аннотация.** В результате анализа ледяного покрова, геологического строения и тектоники подстилающих пород в районе озера Восток в Антарктиде установлено слоистое субгоризонтальное строение ледяного покрова и распределение параметров состава льда. Экспериментально определены физико-механические свойства подстилающих пород. Комплексная тектоника выявила увеличение геотермального потока в районе бассейна Восток, который играет роль в эволюции земной коры и формировании морфологии ее физических свойств. Построена и исследована трехмерная геомеханическая модель единой системы «ледник — озеро Восток — горная порода». Выявлены закономерности в изменении напряженно-деформированного состояния. Установлены зоны развития пластических деформаций в ледяном покрове по периметру озера Восток и их распределение по озеру, что подтверждено результатами натурных наблюдений. Моделирование геомеханических процессов показывает, что изменение механического состояния земной коры с учетом ползучей деформации ледяного покрова в большей степени относится к нелинейным динамическим системам, которые характеризуются нестабильными изменениями и должны рассматриваться как фрактальные системы.

**Ключевые слова:** Антарктида, фрактальные системы, геомеханическая модель, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, подледниковое озеро Восток.

## Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica

Vladimir S. LITVINENKO and Vladimir L. TRUSHKO ✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 199106 Saint Petersburg, Russia

✉ rectorat@spmi.ru

**Abstract.** As a result of analysis of the ice cover, geological structure and tectonics of the underlying rocks in the Lake Vostok area of Antarctica, a layered sub-horizontal structure of the ice cover and a distribution of the parameters of the ice composition were established. The physical and mechanical properties of the underlying rocks were determined experimentally. Complex tectonics revealed an increase in geothermal flow in the Vostok Basin region, which plays a role in the evolution of the Earth's crust and in shaping the morphology of its physical properties. A three-dimensional geomechanical model of the unified system 'glacier-Lake Vostok-bedrock' was constructed and investigated. Regularities in the changes to the stress-strain state were revealed. Zones of development of plastic deformation in the ice cover along the perimeter of Lake Vostok and their distribution over the lake were established, which were confirmed by results from field observations. Modelling of geomechanical processes shows that the change in the mechanical state of the Earth's crust, taking into account the creep deformation of the ice sheet, relates more to nonlinear dynamic systems, which are characterized by unstable changes and should be considered as fractal systems.

**Keywords:** Antarctica, fractal systems, geomechanical model, numerical modelling, stress-strain state, subglacial Lake Vostok.

---

\* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© The Author(s), 2025. Published by Cambridge University Press on behalf of Antarctic Science Ltd. This is an Open Access article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution licence (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted re-use, distribution and reproduction, provided the original article is properly cited.

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

## Введение

Определение восходящего кондуктивного теплового потока, одного из механизмов внутриземного тепловыделения, занимает особое место в изучении подледникового озера Восток в Антарктиде. Это важно не только для выяснения генезиса озера и связанной с ним эволюции жизни на Земле, но и для достоверного определения теплового потока из недр Земли, который играет роль в эволюции антарктической коры и формировании ее морфологии и физических свойств. В реальных условиях наличие глобального неоднородного ледяного покрова с деформацией ползучести, а также структурных и теплофизических неоднородностей в земной коре [31], влияет на геомеханические процессы, происходящие под воздействием естественных причин, которые можно рассматривать как нелинейную динамическую систему (близкую к фрактальной). Это процесс с непостоянными и непериодическими переменными траекториями. Для установления закономерности деформирования ледяного покрова и его прогиба в районе станции Восток использовались полученные физико-механические свойства пород Восточной Антарктиды и упругопластические модели среды с учетом деформации ползучести для ледяного покрова. Моделирование геомеханических процессов воздействия ледникового покрова рассматривалось во времени как линейная динамическая система.

Изучение ледникового покрова и подледникового озера Восток в Антарктиде сейсмическими и радиолокационными методами ведется с 1960 года, когда были проведены сейсмическое зондирование методом отраженных волн и определение толщины ледника и подледникового рельефа [26, 27, 23, 20].

Установлены коренной рельеф и глубины озера Восток, которое представляет собой впадину в виде опущенного блока земной коры в протяженной субмеридиональной области разрушения литосферы размером  $\sim 310 \times 100$  км [Рис. 1; 27, 21, 20]. На акватории выявлено одиннадцать островов общей площадью 365 км<sup>2</sup>. Площадь самого крупного из них составляет 175 км<sup>2</sup> [23].

Озеро Восток — изолированный водоем с площадью акватории 15 790 км<sup>2</sup> и объемом водоема 6100 км<sup>3</sup>. Высота над уровнем моря колеблется от 600 до 150 м [22, 23, 21]. Средняя глубина озера составляет  $\sim 400$  м. Согласно генеральному плану озера, южная часть озера размером 70×30 км является наиболее глубокой, со средней глубиной  $\sim 900$  м и максимальной глубиной в центральной части до 1200 м [27]. Северная часть озера размером 150×70 км имеет среднюю глубину  $\sim 300$  м и максимальную глубину до 600 м [22, 21]. Концентрация растворенного кислорода в воде озера оценивается в 27–1300 мг/л, что в 2–90 раз превышает содержание кислорода в воде при нормальных условиях [1].

Дно той части озера Восток, которая была изучена с помощью сейсмических измерений, имеет форму ступенчатого изгиба с глубинами дна 4310–5040 м от поверхности льда, где восточная ступень (глубина 4310 м) приподнята относительно западной на 140 м.

Наибольшая толщина слоя воды (1200 м) наблюдается в центральной части профиля S1 [Рис. 1; 16]. Дно озера в верхней части, по-видимому, покрыто рыхлыми осадками толщиной 40–300 м [10].

Акватория озера Восток представлена холмистой подводной равниной. В западной части озера Восток расположен преимущественно горный ландшафт с высотами до 1580 м, а в восточной части — холмистый и равнинный рельеф с перепадами высот в среднем 100 м [21]. Толщина земной коры составляет 34 км к западу от впадины Восток и 36 км к западу от впадины Восток и 36 км к востоку [23].

Дно озера в верхней части, по-видимому, покрыто рыхлыми осадками толщиной 40–300 м [10]. Акватория озера Восток представлена холмистой подводной равниной. В западной части озера Восток преобладает горный ландшафт с высотами до 1580 м, а в восточной — холмистый и равнинный рельеф с перепадами высот в среднем 100 м [21].

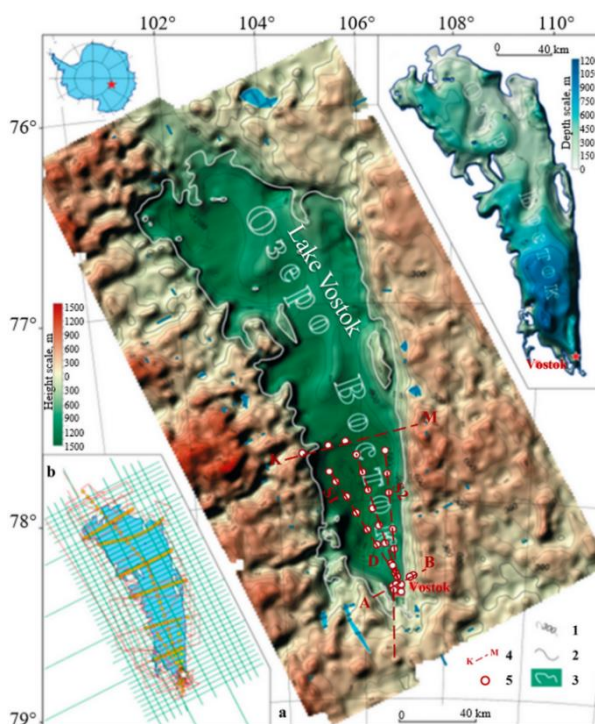


Рис. 1. Коренной рельеф и подледниковые водоемы в районе озера Восток:  
 1 — изогипсы коренного рельефа, сечение изолиний через 150 м; 2 — уровень моря;  
 3 — береговая линия озера; 4 — сейсмические профили; 5 — точки съемки сейсмических отражений, выполненных в рамках 46-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ).  
 На левом нижнем врезе показана схема расположения использованных геофизических данных; синим цветом показаны подледниковые водоемы; красным цветом показаны отечественные радиолокационные маршруты [21]

На глубине 55–60 км под озером Восток предположительно выявлена локальная геостранственная область с повышенным геотермальным потоком вдоль транскруптального разлома в земную кору [7]. Бассейн Восток может иметь рифогенную природу, так как зоны разломов не прослежены выше фундамента, и возможно, что «восточный» блок находится в растянутом состоянии, а «западный» — в сжатом [7]. В то же время в районе бассейна озера Восток и к востоку от него возможно увеличение геотермального потока [23].

В «западном» блоке верхняя граница фундамента расположена на глубине  $3500 \pm 200$  м. Она неровная, но не стратифицированная [7]. Толщина донных осадков различна и составляет от 40 до 300 м [10].

Толщина осадочных пород варьируется от 400 м на севере до 1000 м на юге. Ниже этой границы на глубине 3,8–5,0 км залегает кристаллический фундамент [7]. Осадочный пласт состоит из отложений от верхнего протерозоя до юры включительно и представляет собой отложения ледникового и ледниково-морского генезиса, с присутствием алевроито-глинистых отложений с включениями грубозернистого материала (диамектиты; [5]).

Кристаллический фундамент сложен магматизированным и гранитизированным комплексом гнейсов и кристаллических сланцев общей мощностью 15–20 км.

В кристаллическом фундаменте широко распространены докембрийские и нижнепалеозойские интрузии габбро-анортозитов и чарнокитов, а также раннемезозойские интрузии нефелиновых сиенитов [19].

При вскрытии конжеляционного слоя льда скважиной 5Г были обнаружены мелкие (0,1–1,0 см) минеральные включения, захваченные ледником при его движении через западную мелководную часть озера [10]. Пробы озерной воды [13] полученные во время первого вскрытия озера Восток 5 февраля 2012 г., были изучены ранее [15].

Большая часть донных осадков, накопленных в озере Восток и захваченных в процессе нарастания нижнего слоя льда в виде мелких включений, поступила с западного берега озера в результате экзарации коренного ложа ледника. Эти включения содержат косвенную информацию о его геологическом строении.

Исследования керн из скважины 5 G [27] показали, что на глубине 3538 м в основании ледниковых толщ залегает слой аккреционного льда толщиной 200 м, образовавшийся в результате замерзания озерной воды над основанием медленно движущегося (3 м/год) ледника. Верхняя часть этого слоя (от 3538 до 3608 м) насыщена твердыми (минеральными), неравномерно распределенными (от 2 до 25 на 1 м керн) включениями размером 1–2 мм, которые были захвачены при его формировании, когда ледник пересекал мелководную прибрежную зону озера, расположенную к северо-западу от скважины [27]. Они фактически отражают состав его донных отложений, являясь носителями уникальной информации о геологическом строении подледниковой среды.

Установлено, что минеральные включения представляют собой агломераты, образовавшиеся в результате коагуляции глинисто-слюдяных минералов (размером 0,3–0,5 мкм). Среди глинистых минералов преобладают иллит и хлорит, присутствуют обломки (обычно округлые и угловатые) породообразующих и акцессорных минералов. Достоверно определены кварц 10–100 мкм, турмалин (~70 мкм), эпидот, циркон и горнбленд (50–100 мкм), а также рутил, доломит и гидроксиды железа. Установлено, что общая размерность вещества, слагающего твердые включения, соответствует пелито-алевритовой фракции отложений. Вблизи озера расположена крупная гравитационная аномалия. Наличие этой аномалии и глинистых частиц во льду позволяет предположить, что эта часть сложена осадочными породами, возможно, пермо-триасового возраста [10].

Угловая форма кварца и акцессорных минералов свидетельствует о ледниковом переносе обломочного материала. Благодаря находке циркона удалось определить возраст пород, подвергшихся экзарации, который составляет 1,74 млрд лет, что соответствует времени формирования метаморфических комплексов протерозойского подвижного пояса Антарктического кристаллического щита.

Российские исследования и исследования других стран показали хорошее согласие по толщине воды и осадочных пород между гравитационной моделью и сейсмическими измерениями, что подтверждает два основных факта об озере Восток: озеро состоит из осадочных пород, а дно озера покрыто слоем неконсолидированных осадков, толщина которого не превышает 300 м в южной котловине и почти 400 м в северной котловине.

Ледяной покров над озером имеет слоистое, субгоризонтальное строение распределения параметров вещественного состава, петрофизических и петрографических свойств, а также скорости и направления движения ледяных масс (Рис. 2). До глубины 3539 м ледниковый покров сложен льдом атмосферного происхождения, но глубже 3539 м и до контакта ледника с поверхностью озерной воды на глубине 3769,3 м ледниковый покров сложен конжеляционным (озерным) льдом, образованным из воды подледникового резервуара (Рис. 2).

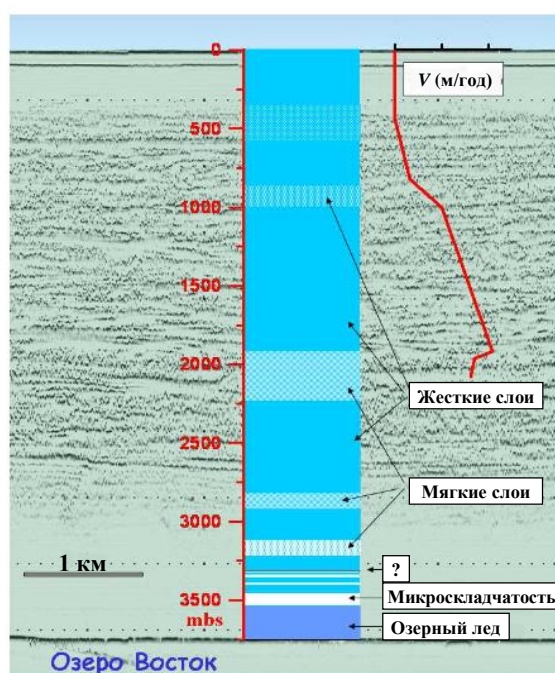


Рис. 2. Слои льда с различными реологическими свойствами в разрезе ледяного покрова в районе станции Восток. Построен профиль скорости льда  $V$  относительно поверхности по данным геофизических исследований глубокой скважины

Лед не является абсолютно твердым телом. Даже при низком давлении он проявляет пластические свойства. Это означает, что он меняет свою форму или течет, не превращаясь в жидкость. Экспериментальные и расчетные данные физических свойств льда [3, 29, 30] приведены в Таблице 1.

Таблица 1

#### Усредненные физико-механические характеристики льда

Параметр	Значение
Плотность чистого льда $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	920
Пористость поверхностного снега $c_s$	0,69
Показатель уплотнения $\gamma_s$ , м <sup>-1</sup>	0,021
Показатель ползучести $\alpha$ в законе Глена	3,0
Геотермический поток $q_0$ , Вт/м <sup>2</sup>	0,054
Температура плавления льда (на глубине 3700 м) $T_f$ , °C	-2,7
Современная скорость аккумуляции льда $b_0$ , см/год	2,15
Модуль Юнга $E$ , Па	$9,33 \cdot 10^9$
Модуль объемной деформации $B$ , Па	$8,90 \cdot 10^9$
Модуль сдвига $G$ , Па	$3,52 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,35

Механические свойства льда зависят от его структуры, пористости, солёности и температуры [6, 8, 9, 17, 18].

Структурные преобразования в толщах антарктических ледников были изучены в результате анализа керна из скважины 5 G на глубине 3769,3 м [11, 14]. Установлена общая закономерность увеличения размеров кристаллов льда с глубиной (Рис. 3). До глубины 2500 м размеры кристаллов не превышают 5 мм, а затем наблюдается их значительный рост. При этом изменяется и ориентация главных осей кристаллов.

Экспериментальные исследования показали, что с понижением температуры увеличивается и предел текучести льда: при понижении температуры от -1,7 °C до -20 °C предел текучести льда увеличивается более чем на 200 %, а до -30 °C — на 300 %. Кривая деформации имеет упруго-пластическую форму с ярко выраженной областью текучести [4].

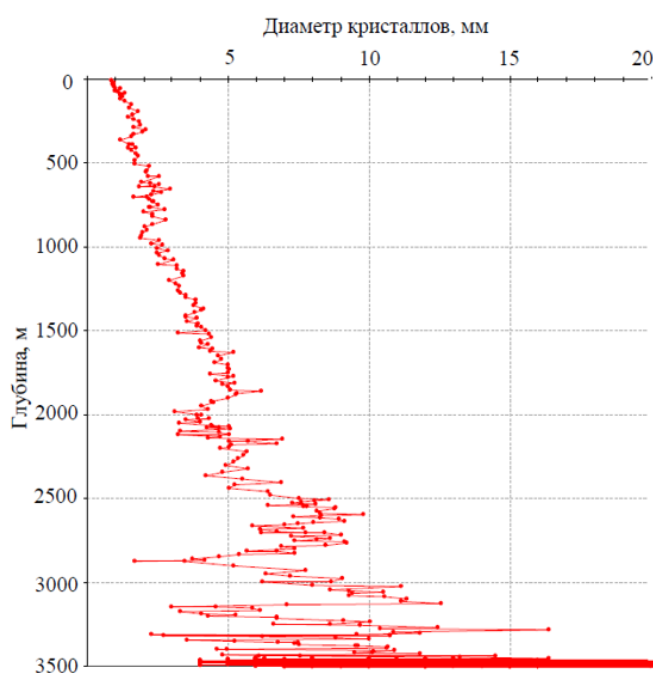


Рис. 3. Изменение размера зерен льда с глубиной [11]

### Методология

На основе опубликованных и экспериментальных данных о ледяном покрове и подстилающих породах, коренном рельефе и глубинах подледникового озера Восток [25, 5, 26, 1, 22, 21], была построена трехмерная модель, в которой при численном моделировании напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, вод озера Восток и подстилающих пород использовались упругая модель средних деформаций и упруго-пластическая модель средних деформаций на основе модифицированного критерия текучести фон Мизеса. Обоснование долговременных деформационных характеристик льда выполнено на основе принятой реологической модели [2, 28].

В упругой модели деформирования среды связь между деформациями  $\varepsilon$  и напряжениями  $\sigma$  (Ур. 1) записывается через матрицу упругости  $[D]$ , которая включает набор коэффициентов, определяющих поведение среды:

$$\sigma = [D]\varepsilon. \quad (1)$$

Матрица упругости для изотропной линейно-деформируемой среды записывается в следующем виде (Ур. 2):

$$[D] = \frac{E_y}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $E_y$  — модуль упругости, а  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Упруго-пластическая модель деформирования среды, основанная на модифицированном критерии текучести фон Мизеса, записывается в следующем виде (Ур. 3):

$$\sigma_y = q, \quad (3)$$

где  $\sigma_y$  — граничное значение растягивающих напряжений, соответствующее истинному пределу текучести льда, а  $q$  — интенсивность нормальных напряжений.

Для условий объемных напряжений (Ур. 4):

$$q = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (4)$$

Для описания реологических процессов в ледяном покрове используется модель двойного степенного закона, которая дает наиболее полное описание развития длительных деформаций, характерных для второй стадии ползучести (т.е. стадии установившейся ползучести).

Модель позволяет учесть влияние интенсивности касательных напряжений на скорость развития деформаций ползучести, а также влияние температуры. Для льда зависимость скорости деформации ползучести от его состояния преобразуется к следующему виду [Ур. 5; 24]:

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{\theta - \theta_z}\right) \left(\frac{q_k}{\sigma_0}\right)^{C_1} + A_2 \exp\left(-\frac{B_2}{\theta - \theta_z}\right) \times \left(\frac{q_k}{\sigma_0}\right)^{C_2}, \quad (5)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$  параметры реологической модели, определенные экспериментально,  $\theta$  — температура льда,  $\theta_z$  — температура абсолютного нуля,  $\sigma_0$  — управляющий параметр (принимается равным 1 МПа),  $q_k$  — интенсивность касательного напряжения.

Параметры принятых моделей деформирования материала представлены в Таблице 2.

**Физико-механические характеристики материалов.**

Показатели взяты приблизительно и будут уточнены по результатам лабораторных исследований. Числители показывают мгновенные значения показателей, а знаменатели — долгосрочные значения

Наименование материала	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, МПа	Модуль объемного сжатия, МПа	Коэффициент поперечной деформации	Прочность сжатия, МПа	Прочность растяжения, МПа
Ледовый покров	920	$\frac{9000}{1000}$	–	$\frac{0,350}{0,495}$	10	1
Вода озера Восток	1000	–	2100	0,499	–	–
Подстилающие породы	2600	10 000	–	0,230	–	–

Описанные модели реализованы в программном комплексе *SIMULIA Abaqus CAE*.

Для прогноза напряженно-деформированного состояния ледяного щита, вод озера Восток и подстилающих пород построены две конечно-элементные модели в плоско деформированном (Рис. 4а) и пространственном (Рис. 4б) режимах. Построение геометрии моделей осуществлялось на основе данных геофизических исследований с некоторыми упрощениями, не оказывающими существенного влияния на результаты прогноза напряженно-деформированного состояния.

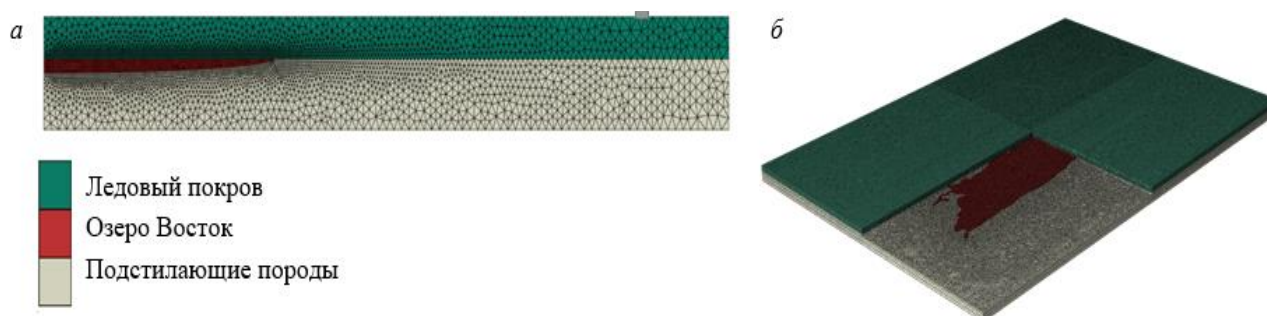


Рис. 4. Плоская (а) и пространственная (б) конечно-элементные модели прогноза напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, вод озера Восток и подстилающих пород

Задача решалась в гравитационной постановке со следующими граничными условиями: смещения вдоль нижней границы модели запрещены во всех направлениях; смещения вдоль боковых границ модели запрещены в направлении, нормальном к этим границам; смещения вдоль верхней границы модели не ограничены.

Размеры плоской модели: ширина = 90 км и высота = 10 км. Геометрия разбита на треугольные квадратичные конечные элементы. Размеры пространственной модели: длина = 2360 км, ширина = 2360 км и высота = 10 км. Геометрия разбита на тетраэдрические квадратичные конечные элементы.

Численное моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния рассматриваемой системы проводилось в следующей последовательности: формирование начального напряженного состояния до образования ледяного покрова; формирование напряженного состояния рассматриваемой системы в процессе образования ледяного покрова.

**Определение свойств горных пород**

При исследовании физико-механических свойств горных пород, в связи с ограниченным объемом отбираемых образцов и их нестандартной формой, использовались методы испытания образцов правильной (цилиндрической) и неправильной формы сферическими инденторами.

Исследования проводились по стандартной методике (ГОСТ 24941-81) и дополнены данными для определения комплекса механических параметров по усовершенствованной методике, разработанной в лаборатории физико-механических свойств Санкт-Петербургского горного университета. Предварительно в образцах были измерены скорости упругих волн, а затем проведены испытания в режиме контролируемой деформации.

Определены следующие показатели физико-механических характеристик образцов: плотность образцов правильной формы (объемная плотность), скорости распространения упругих продольных (VP) и поперечных волн (VS), пределы прочности при одноосном сжатии ( $\sigma_{cj}$ ) и растяжении ( $\sigma_r$ ), показатель хрупкости (Bi), когезия (C) при объемном сжатии и соответствующий угол внутреннего трения ( $\varphi$ ), а также деформационные характеристики — модули общей деформации и упругости, коэффициенты поперечной деформации, модуль снижения несущей способности и остаточная прочность. Проведена статистическая обработка результатов испытаний.

Описание образцов приведено в Таблице 3.

Таблица 3

Краткое описание отобранных образцов

Проба №	Место отбора	Описание пробы
51101	Восточный край ледника Амери, остров Мусиньо	Мелко- и короткозернистый чарнокитоид (кембрийские метаморфизованные интрузии)
51101-1	Восточный край ледника Амери, остров Мусиньо	Прожилковый, средне- и крупнозернистый гранитоидный гнейс (кембрийские метаморфизованные интрузии)
52338-1	Массив Фишера, центральная часть	Серпентинизированный ультрабазит (мезопротерозойские метаморфизованные интрузии)
52826-3	Массив Фишера, юго-восточные породы	Крупнозернистый кварцевый монзогаббро (мезопротерозойские метаморфизованные интрузии)
52908-1	Горы Принца Чарльза, район озера Бивер	Полимиктовый гравелит (пермо-триасовые отложения)
52908-6	Горы Принца Чарльза, район озера Бивер	Полимиктовый конгломерат (пермо-триасовые отложения)
52910-1	Горы Принца Чарльза, район озера Бивер	Среднезернистый гравийный песчаник (пермо-триасовые отложения)
53431-3	Залив Прюдс, остров Беллинген	Мелкозернистый биотит-гранатовый гнейс (неопротерозойские метаморфизованные отложения)
54427-2Б	Горы Принца Чарльза, массив Маклауд, западный берег озера Радок	Крупнозернистый микроклиновый гранит (неопротерозойские интрузии)
5410 (54427-2Б)	Горы Принца Чарльза, массив Маклауд, западный берег озера Радок	Мелко- и среднезернистый ортогнейс среднего состава (мезо-неопротерозойские первичные магматические образования)

## Результаты

В результате лабораторных исследований 10 образцов горных пород из Восточной Антарктиды получена новая информация о литологических разностях фундамента и установлено наличие пермо-триасовых осадочных отложений в синрифтовом комплексе.

Результаты испытаний 10 образцов, представленных магматическими, метаморфическими и осадочными породами, собранными в Восточной Антарктиде (район гор Принца Чарльза), приведены в табл. 4. Представлен комплекс физико-механических параметров пород, определенных по результатам испытаний образцов неправильной формы со сферическими инденторами: пределы прочности при одноосном растяжении ( $\sigma_r$ ) и сжатии ( $\sigma_{cj}$ ), показатель хрупкости (Bi), предел прочности при сдвиге без нормальных напряжений (когезия;  $C_0$ ) и соответствующий угол внутреннего трения ( $\varphi_0$ ), когезия (C) при объемном сжатии и соответствующий угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) модуль упругости ( $E_y$ ) и коэффициент Пуассона ( $\nu$ ), остаточная прочность при одноосном сжатии ( $\sigma_R$ ). Проведена статистическая обработка данных.

Результаты расчетов и прогноза напряженно-деформированного состояния системы «ледяной покров-озеро-подстилающие породы» представлены в виде диаграмм распределения вертикальных и горизонтальных напряжений, а также в виде диаграмм результирующих абсолютных деформаций и диаграмм пластических деформаций.

Результаты расчетов в постановке плоской деформации (Рис. 5) позволяют судить о характере прогиба ледяного покрова над озером Восток и изменении напряженного состояния воды в озере. Установлено, что потенциальный прогиб ледяного покрова может достигать 250 м при принятых механических характеристиках модулей льда и водной массы.

**Результаты испытаний образцов неправильной формы сферическими инденторами  
и их статистическая обработка**

Номер пробы	Проба	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$K_{xp}$	$C_0$ , МПа	$\phi_0$ , град	$C$ , МПа	$\phi$ , град	$\tau_{max}$	$\mu$	$\sigma_R$ , МПа	$E_y \cdot 10^4$ , МПа
1	521101	38,30772*	280,0981	7,463779	66,46047	54,32151	78,10359	31,05589	535,3268	0,294752	21,26	4,9
		5,230771**	63,19991	2,180692	7,177906	6,396274	11,14079	4,706684	319,4989	0,118624	3,59	0,41
		13,65461***	22,56349	29,21699	10,80026	11,77484	14,26412	15,15553	59,68297	40,2454	16,88617	8,367347
		4****	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2	51101-1 перпенд.	7,730005	53,74231	6,964979	13,14289	53,70193	15,28877	30,47448	87,88383	0,298178	5,24	1,2
		3,057001	23,17355	1,058411	5,401421	3,622346	6,374545	2,58813	44,24567	0,072146	1,94	0,2
		39,54721	43,11975	15,19619	41,09766	6,745281	41,69429	8,492779	50,34563	24,19549	37,0229	16,66667
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	51101-1 парал.	10,65343	53,88671	5,13884	15,41279	46,5601	17,0541	25,50567	54,76203	0,452151	24,52	–
		3,059592	12,65147	0,510185	4,001538	2,488361	4,292722	1,66136	10,68128	0,060165	4,64	–
		28,71931	23,47791	9,928022	25,96245	5,344407	25,1712	6,51369	19,50491	13,3064	18,92333	–
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	–
3	52338-1	43,11024	247,8883	5,768515	66,51789	49,47749	75,06432	27,47218	306,1374	0,383523	24,526	6,5
		8,033813	52,08783	0,698329	12,61762	3,01989	14,59549	2,06379	100,1864	0,067915	4,640046	2,5
		18,63551	21,01262	12,10588	18,96876	6,103563	19,44397	7,51229	32,72595	17,7083	18,91889	38,46154
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	52826-3	17,66563	121,0857	6,989387	29,77686	53,55363	34,57335	30,39909	198,0854	0,303142	9,82625	2,7
		7,548924	55,39224	1,308642	12,96187	4,262734	15,24687	3,076626	114,7121	0,082596	4,193549	0,32
		42,73227	45,74632	18,72327	43,53002	7,959748	44,10005	10,12078	57,91043	27,24654	42,67701	11,85185
		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
5	52908-1	8,475596	47,56542	5,670496	12,90471	48,84137	14,513	27,06607	57,71404	0,40072	4,85	3,4
		1,985592	10,11841	0,962914	2,669237	4,13745	2,975296	2,828671	21,81659	0,093363	1,2	0,54
		23,42717	21,27261	16,98112	20,68421	8,471199	20,5009	10,45098	37,80119	23,2987	24,74227	15,88235
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6	52908-6	8,885295	59,16962	7,062955	14,72893	53,54988	17,03179	30,42855	95,71384	0,305382	4,97	1,5
		3,489844	14,01227	1,639988	4,405751	5,037831	4,676626	3,662253	31,94282	0,097257	2,09	0,19
		39,27663	23,68153	23,21958	29,91222	9,407734	27,45821	12,03558	33,37326	31,84769	42,05231	12,66667
		6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	52910-1	5,800909	33,8511	5,882291	9,015565	49,89674	10,1982	27,76757	42,94855	0,374847	3,29	1,3
		1,922801	10,79403	0,810901	2,871862	3,3046	3,234003	2,281191	17,02848	0,072663	1,11	0,01
		33,14655	31,88678	13,78546	31,85449	6,622877	31,71152	8,215309	39,64857	19,38471	33,7386	0,769231
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	2
8	53431-3	24,12385	179,2449	7,628907	42,17863	54,75762	49,70744	31,37848	354,0061	0,286513	13,37	3,6
		4,537201	41,7168	2,308339	5,600976	6,327778	7,815362	4,698811	229,754	0,116121	2,96	0,73
		18,80794	23,27363	30,25779	13,27918	11,55598	15,72272	14,97463	64,90116	40,52916	22,13912	20,27778
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9	54427-Б	24,75456	166,9738	6,887386	41,36243	53,23575	47,90744	30,16733	269,032	0,309094	13,8	2,4
		6,186016	40,03593	1,400078	9,148416	4,582923	10,65471	3,306678	120,8175	0,088692	3,63	0,22
		24,9894	23,97737	20,32815	22,11769	8,608732	22,2402	10,96112	44,90824	28,69409	26,30435	9,166667
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
10	5410-1	22,86534	156,1108	7,019673	38,52449	53,98698	44,67762	30,66284	247,9634	0,291178	12,69	4,4
		10,29432	63,87992	0,932596	16,36949	2,895051	18,70434	2,113176	101,2884	0,054044	5,81	0,4
		45,02151	40,91959	13,28546	42,49112	5,362498	41,86512	6,891652	40,84811	18,56064	45,78408	9,090909
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

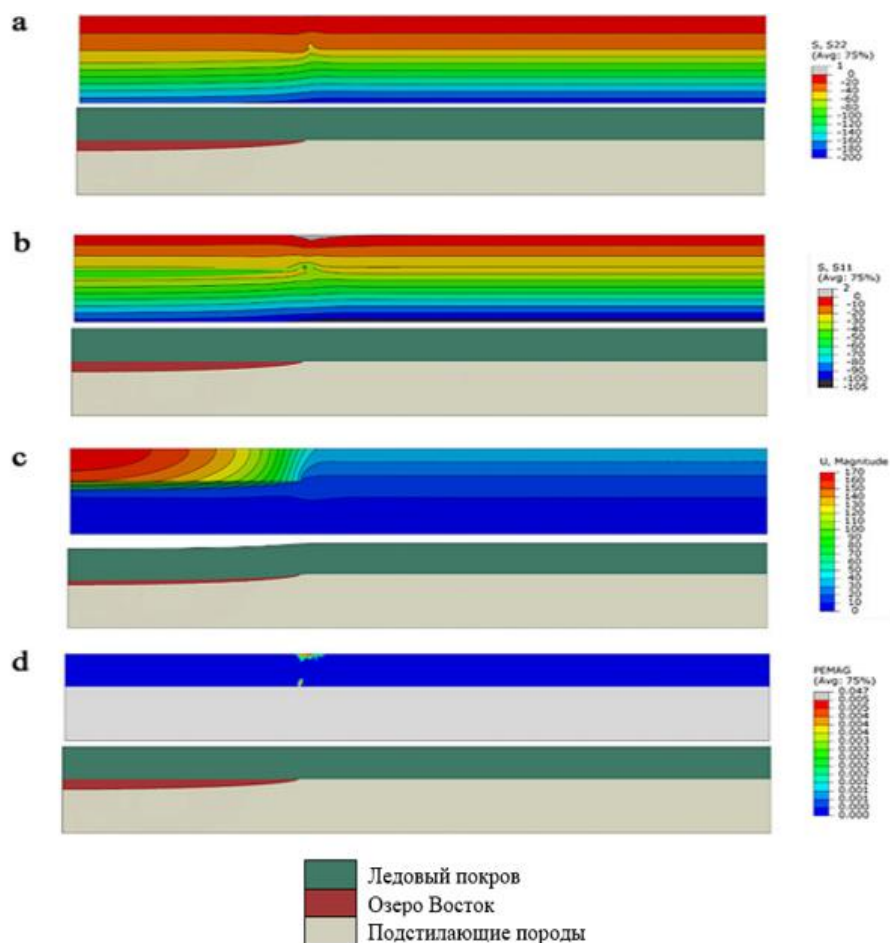


Рис. 5. Картина распределения в плоско-деформационной постановке в ледовом покрове, водах озера Восток и подстилающих породах: а — вертикальных напряжений (МПа); б — горизонтальных напряжений (МПа); в — результирующих абсолютных деформаций (м); г — пластических деформаций (д.е.)

Влияние изменения долгосрочного модуля деформации льда в диапазоне 250–1000 МПа и модуля объемной деформации воды в диапазоне 2100–3000 МПа описывается нелинейной зависимостью, при которой значения прогиба ледяного покрова увеличиваются по мере уменьшения модуля деформации (Рис. 6).

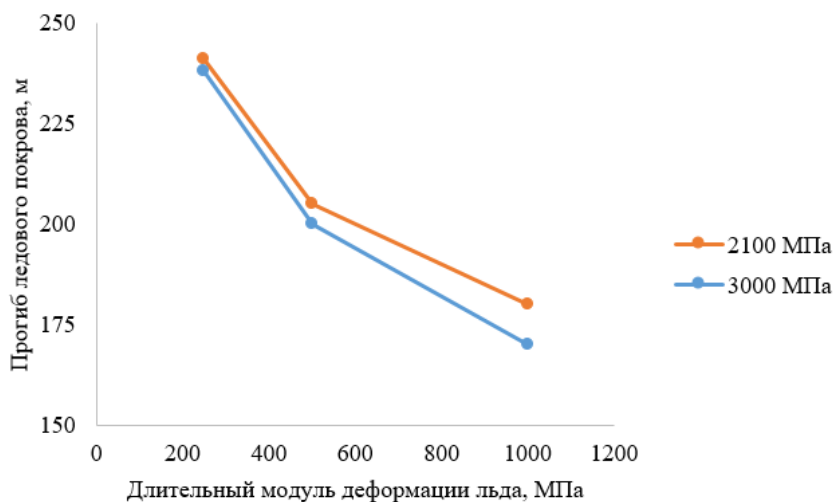


Рис. 6. Изменение максимальной величины прогиба ледового покрова в зависимости от длительного модуля деформации льда и модуля объемного сжатия воды в озере Восток

Наибольший прогиб наблюдается над центром озера Восток. Картины распределения напряжений свидетельствуют о сложном характере распределения напряжений в рассматриваемой системе в окрестности озера. Зона пластических деформаций формируется в краевых областях озера и, как показывают результаты, не распространяется на всю высоту ледяного покрова.

Результаты расчетов, выполненных в пространственной постановке, представлены в виде профилей распределения вертикальных и горизонтальных напряжений и результирующих абсолютных и пластических деформаций (Рис. 7). Учет сложной геометрии озера Восток позволил уточнить характер формирования напряженно-деформированного состояния ледяного покрова. В целом можно отметить качественную и количественную сходимость результатов моделирования в плоскостных и пространственных постановках.

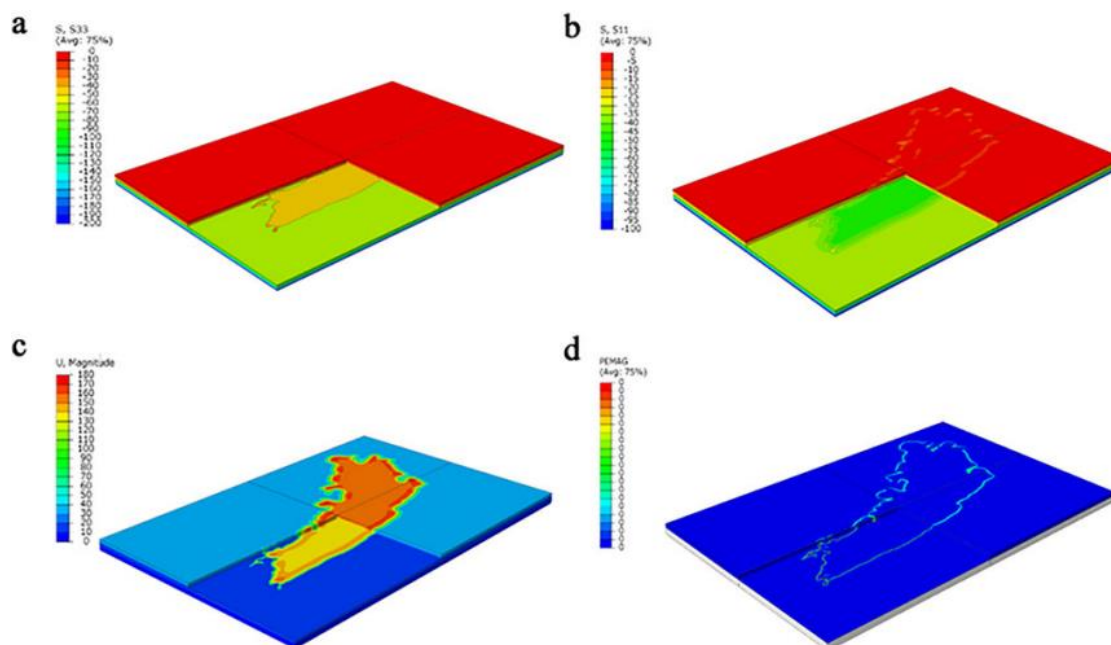


Рис. 7. Картины распределения в пространственной постановке в ледовом покрове, водах озера Восток и подстилающих породах:  
 а — вертикальных напряжений (МПа); б — горизонтальных напряжений (МПа);  
 в — результирующих абсолютных деформаций (м); г — пластических деформаций (д.с.)

## Обсуждение

Для проверки достоверности и корректности результатов численного моделирования геомеханическая модель была верифицирована по данным экспериментальных испытаний образцов подстилающих пород и полевых наблюдений в скважине 5Г, пробуренной на глубину 3769,3 м до поверхности озера Восток.

Геометрические размеры пространственной модели были выбраны таким образом, чтобы погрешность расчетов на границах модели не превышала 1 %.

Усредненные реологические параметры, учитывающие влияние максимальной скорости деформации ползучести ( $A_1$  и  $A_2$ ), нелинейную зависимость между начальной скоростью и напряжениями ( $C_1$  и  $C_2$ ) и зависимость скорости деформации ползучести от температуры ( $B_1$  и  $B_2$ ), подобраны с необходимой точностью для описания процесса деформирования ледяного покрова по данным полевых наблюдений в скважине 5Г.

Значения напряжений на контакте ледника с озером по результатам численного моделирования определены в диапазоне 32,0–35,0 МПа, а в районе скважины 5Г — 34,60 МПа, что удовлетворительно коррелирует с экспериментальными данными по давлению ледника на контакте с озером  $33.78 \pm 0,05$  МПа, полученными по результатам измерения плотности ледяного керна из скважины 5 Г [12]. Небольшое расхождение в результатах объясняется усреднением в модели реологических свойств льда по слоям, а также фрактальными свойствами кристаллов льда и изменением температуры по глубине ледяного покрова.

## Заключение

Разработана новая трехмерная геомеханическая модель системы «ледник-подледник-озеро-порода», позволяющая моделировать изменения напряженно-деформированного состояния системы с учетом бурения глубоких скважин.

Впервые экспериментально определен комплекс физико-механических характеристик пород Восточной Антарктиды (район гор Принца Чарльза), включающий объемную плотность, скорости распространения упругих продольных и поперечных волн, предел прочности при одноосном сжатии и растяжении, коэффициент хрупкости, когезию при объемном сжатии и соответствующий угол внутреннего трения, а также деформационные характеристики (модули общей деформации и упругости, коэффициенты поперечной деформации, модули снижения несущей способности и остаточной прочности).

Численное моделирование показало, что прогиб ледяного покрова при заданных характеристиках льда может достигать величины 250 м и более. Изменение механических характеристик ледяного покрова может существенно повлиять на эту величину.

Отмечено, что напряжения в водах озера Восток распределяются по гидростатическому закону, а напряжения в ледяном покрове — по закону, близкому к гидростатическому. Определены зоны развития пластических деформаций ледяного покрова над озером Восток. Показано, что пластические деформации в ледяном покрове локализованы в областях по периметру озера, а максимальная интенсивность их распространения приурочена к нижним и верхним слоям ледяного покрова.

Полученные данные удовлетворительно согласуются с результатами натурных наблюдений, полученных при бурении сверхглубокой скважины и проникновении в подледниковое озеро Восток на глубину 3769,3 м.

Установленные закономерности формирования напряженно-деформированного состояния в элементах рассматриваемой системы могут быть использованы в качестве исходных данных для моделирования процессов бурения скважин, а также для прогнозирования основных параметров природной среды в подледниковом озере Восток и подстилающих породах, необходимых для проектирования и эффективной эксплуатации уникальной исследовательской аппаратуры и приборов.

В дальнейших исследованиях планируется экспериментально уточнить структуру и прочностные и деформационные характеристики ледяного покрова, а также подстилающих пород, выявить влияние глубинных геотермальных потоков, что позволит усовершенствовать трехмерную геомеханическую модель системы «ледник — подледниковое озеро-порода» и рассматривать ее как динамическую нелинейную систему в рамках крупномасштабного исследования подледникового озера Восток.

**Вклад авторов.** Оба автора внесли равный вклад в подготовку статьи. Оба автора прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность профессору М. А. Карасеву за помощь в подготовке расчетов и анонимным рецензентам за полезные замечания по улучшению работы.

**Финансовая поддержка.** Работа выполнена в рамках темы «Фундаментальные междисциплинарные исследования геологических формаций Антарктиды».

**Конкурирующие интересы.** Авторы заявляют об отсутствии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Arapov, P.P., Lipenkov, V.Y. & Savatyugin, L.M. 2005. Issledovanie podlednikovogo ozera Vostok v Antarktide [Research of subglacial Lake Vostok in Antarctica]. Vestnik of St. Petersburg University. Earth Sciences, 2, 119–121.
2. Ashby, M.F. & Duval, P. 1985. The creep of polycrystalline ice. Cold Regions Science and Technology, 11, 10.1016/0165-232x(85)90052-7.
3. Epifanov, V.P. 2007. Reologicheskie osobennosti antarkticheskogo l'da [Rheological peculiarities of Antarctic ice]. Materials of Glaciological Studies, 103, 96–106.
4. Glazovsky, A.F., Epifanov, V.P. & Yuryev, R.V. 2008. Reologicheskie harakteristiki l'da i ikh vliianie na dinamiku Antarkticheskogo lednikovogo pokrova [Rheological parameters of ice and their implication on the Antarctic ice sheet dynamics]. Proceedings of Glaciological Research, 105, 17–28.
5. Grikurov, G.E., Leichenkov, G.L., Kamenev, E.V., Mikhalsky, A.V., Golinsky, V.N., Masolov, V., et al. 2003. Tektonicheskoe rai'onirovanie Antarktiki i ee minerageniia [Antarctic tectonic and mineragenic provinces]. Arctic and Antarctic, 2, 26–47.

6. Higashi, A., Koinuma, S. & Mae, S. 1964. Plastic yielding in ice single crystals. *Japanese Journal of Applied Physics*, 3, 10.1143/jjap.3.610.
7. Isanina, E.V., Krupnova, N.A., Popov, S.V., Masolov, V.N. & Lukin, V.V. 2009. Deep structure of the Vostok Basin, East Antarctica as deduced from seismological observations. *Geotectonics*, 43, 10.1134/s0016852109030042.
8. Jones, S.J. & Glen, J.W. 1969a. The mechanical properties of single crystals of pure ice. *Journal of Glaciology*, 8, 10.3189/s0022143000027040.
9. Jones, S.J. & Glen, J.W. 1969b. The effect of dissolved impurities on the mechanical properties of ice crystals. *Philosophical Magazine*, 19, 10.1080/14786436908217758.
10. Leitchenkov, G.L., Antonov, A.V., Luneov, P.I. & Lipenkov, V.Ya. 2016. Geology and environments of subglacial Lake Vostok. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374, 10.1098/rsta.2014.0302.
11. Lipenkov, V.Ya., Polyakova, E.V., Duval, P. & Preobrazhenskaya, A.V. 2007. Internal structure of the Antarctic ice sheet in the vicinity of Vostok station from the deep-ice core thin-section studies. *Arctic and Antarctic Research*, 70, 6–20.
12. Lipenkov, V.Ya., Turkeev, A.V., Vasilev, N.I., Ekaykin, A.A. & Poliakova, E.V. 2021. Melting temperature of ice and total gas content of water at the ice-water interface above subglacial Lake Vostok. *Arctic and Antarctic Research*, 67, 10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367.
13. Lipenkov, V.Ya., Ekaykin, A.A., Alekhina, I., Shibaev, Y.A., Kozachek, A., Vladimirova, D., et al. 2017. Evolution of climate, glaciation and subglacial environments of Antarctica from the deep ice core and Lake Vostok water sample studies (key results of implementation of the Russian Science Foundation project, 2014–2016). *Ice and Snow*, 57, 10.15356/2076-6734-2017-1-133-141.
14. Lipenkov, V.Ya., Lukin, V.V., Bulat, S.A., Vasiliev, N.I., Ekaikin, A.A., Leichenkov, G.L., et al. 2011. Scientific outcomes of subglacial lake Vostok studies in the IPY. In Kotlyakov, V.M., ed., *Polar cryosphere and terrestrial waters: Russia's contribution to the International Polar Year 2007/08*. Paris: Paulsen Editions, 17–47.
15. Litvinenko, V. 2020. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic subglacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*, 80, 10.1016/j.chemer.2020.125652.
16. Masolov, V.N., Popov, S.V., Lukin, V.V. & Popkov, A.M. 2010. The bottom topography and subglacial Lake Vostok water body, East Antarctica. *Doklady Earth Sciences*, 433, 10.1134/s1028334x10080222.
17. Michel, B. & Ramseier, R.O. 1971. Classification of river and lake ice. *Canadian Geotechnical Journal*, 8, 10.1139/t71-004.
18. Nanthikesan, S. & Shyam Sunder, S. 1994. Anisotropic elasticity of polycrystalline ice. *Cold Regions Science and Technology*, 22, 10.1016/0165-232x(94)90026-4.
19. Pandey, M., Pant, N.C., Arora, D., Ferraccioli, F., Gupta, R. & Joshi, S. 2023. Unravelling the complex sub-ice geology of the Wilkes Subglacial Basin region of East Antarctica from marine sediment provenance analyses. *Antarctic Science*, 35, 10.1017/S0954102023000123.
20. Popov, S.V. 2021. Six decades of radar and seismic research in Antarctica. *Ice and Snow*, 61, 10.31857/s2076673421040110.
21. Popov, S.V. & Lunev, P.I. 2012. Orografiia korennoogo rel'efa rai'ona podlednikovogo ozera Vostok (Vostochnaia Antarktida) [Orography of the bedrock relief of subglacial lake Vostok and its vicinity (East Antarctic)]. *Geomorphology RAS*, 1, 10.15356/0435-4281-2012-1-81-91.
22. Popov, S.V., Masolov, V.N. & Lukin, V.V. 2011. Ozero Vostok, Vostochnaia Antarktida: moshchnost' lednika, glubina ozera, podledny'i i korennoi' rel'ef [Lake Vostok, East Antarctica: glacier thickness, lake depth, subglacial and bedrock relief]. *Ice and Snow*, 1, 25–35.
23. Popov, S.V., Masolov, V.N., Lukin, V.V. & Popkov, A.M. 2012. Otechestvenny'e seismicheskie, radiolokatsionny'e i seismologicheskie issledovaniia podlednikovogo ozera Vostok [National seismic, radar and seismological studies of subglacial Lake Vostok]. *Ice and Snow*, 52, 10.15356/2076-6734-2012-4-31-38.
24. Protosenya, A.G. & Katerov, A.M. 2023. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 3, 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_16.
25. Ravich, M.G. & Kamenev, E.N. 1972. Kristallicheskie fundament Antarkticheskoi' platformy' [Crystalline basement of the Antarctic platform]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
26. Savatyugin, L.M. & Preobrazhenskaya, M.A. 1999. Rossiiskie issledovaniia v Antarktike. Tom I [Russian studies in Antarctica. Vol. 1]. St Petersburg: Gidrometeoizdat.
27. Savatyugin, L.M., Verkulich, S.R., Masolov, V.N., Sheremetev, A.N., Lipenkov, V.Y., Abyzov, S.S., et al. 2003. Podlednikovoe ozero Vostok (Antarktida): osnovny'e rezul'taty' geofizicheskikh, gliatciologicheskikh i mikrobiologicheskikh issledovani' poslednikh let [Subglacial Lake Vostok (Antarctica): results and prospects of geophysical, glaciological and microbiological studies of recent years]. *Arctic and Antarctic*, 2, 63–75.
28. Shyam Sunder, S. & Wu, M.S. 1990. On the constitutive modeling of transient creep in polycrystalline ice. *Cold Regions Science and Technology*, 18, 10.1016/0165-232x(90)90025-r.
29. Tsyganova, E.A., Popov, S.V., Salamatina, A.N. & Lipenkov, V.Ya. 2010. Rezul'taty' radiolokatsionnogo zondirovaniia i modelirovaniia techeniia lednikovogo pokrova Vostochnoi' Antarktidy' vdol' linii toka, prohodiashchei' cherez stantsiiu Vostok [Results of radar sounding and modeling of the East Antarctica ice sheet flow along the current line passing through Vostok Station]. *Ice and Snow*, 1, 14–29.
30. Vasilev, N.I., Dmitriev, A.N. & Lipenkov, V.Y. 2016. Results of the 5 G borehole drilling at Russian Antarctic station 'Vostok' and researches of ice cores. *Journal of Mining Institute*, 218, 161.
31. Yang, Y. & Song, X. 2023. Multidecadal variation of the Earth's inner-core rotation. *Nature Geoscience*, 16, 10.1038/s41561-022-01112-z.