

DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-2)

EDN <https://elibrary.ru/jtkefu>

УДК 550.361+550.362



© А. Я. Гольмшток<sup>1\*</sup>, А. Л. Пискарев<sup>2,3</sup>, 2026

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового Океана им. акад. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), 190121, Санкт-Петербург, Английский пр-т, д. 1

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет — Институт наук о Земле, 199134, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

\*golmshtok@gmail.com

## Замечания о топографии срединно-океанических хребтов, сформированных синхронно с осадконакоплением на их поверхности (на примере котловин Нансена и Амундсена, Северный Ледовитый океан)

Статья поступила в редакцию 26.10.2025, после доработки 08.01.2026, принята в печать 16.01.2026

### Аннотация

В статье приводится решение задачи о тепловом режиме образующейся океанической литосферы при осадконакоплении на ее поверхности, позволяющее оценить причины существенного контраста глубин моря в котловинах Нансена и Амундсена, окаймляющих хребет Гаккеля в Северном Ледовитом океане. Поскольку действие накапливающегося осадочного покрова на океаническую литосферу складывается как из его гравитационной нагрузки, так и его теплоизолирующего эффекта, в работе выполнено исследование их роли на формирование рельефа окружающих хребтов котловин. Показано, что неучет в изостатических схемах роли теплового воздействия осадконакопления на глубину моря в котловинах может привести к ошибкам порядка нескольких сотен метров. Оценочные глубины моря в котловинах Нансена и Амундсена, вычисленные для литосферы различного возраста с учетом как гравитационного, так и теплового влияния осадконакопления, вполне удовлетворительно сопоставимы с реально существующими. Расчетные перепады глубин моря в опорных точках в центральных областях обеих котловин весьма близки к реальным. Выполненное моделирование образования океанической литосферы в центральной области Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана с учетом как гравитационного, так и теплового влияния процесса осадконакопления показывает, что наблюдаемое в этой области различие глубин в котловинах Нансена и Амундсена действительно определяется мощностями их осадочных покровов и является вполне закономерным.

**Ключевые слова:** океан, хребет, котловина Нансена, котловина Амундсена, осадконакопление, литосфера, температура, фазовый переход

© А. Я. Гольмшток<sup>1\*</sup>, А. Л. Пискарев<sup>2,3</sup>, 2026

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia

<sup>2</sup>Gramberg All-Russia Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (VNIIOkeangeologia), 124 lit. A Moika River Emb., St. Petersburg, 190121, Russia

<sup>3</sup>St Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya Emb., St Petersburg, 199134, Russia

\*golmshtok@gmail.com

## The remarks on the mid-ocean ridges topography formed synchronously with sedimentation on their surface (using the Nansen and Amundsen Basins, Arctic Ocean, as an example)

Received 26.10.2025, Revised 08.01.2026, Accepted 16.01.2026

### Abstract

A solution to the problem of the thermal regime of the forming oceanic lithosphere during sedimentation on its surface is presented. This allows us to assess the causes of the significant contrast in sea depths in the Nansen and Amundsen Basins, located in the Arctic Ocean on either side of the Gakkel Ridge. This paper examines the role of both the gravitational load and the thermal

Ссылка для цитирования: Гольмшток А.Я., Пискарев А.Л. Замечания о топографии срединно-океанических хребтов, сформированных синхронно с осадконакоплением на их поверхности (на примере котловин Нансена и Амундсена, Северный Ледовитый океан) // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2026. Т. 19, № 1. С. 32–44. EDN JTKEFU. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-2)

For citation: Golmshtok A. Ya., Piskarev A. L. The remarks on the mid-ocean ridges topography formed synchronously with sedimentation on their surface (using the Nansen and Amundsen Basins, Arctic Ocean, as an example). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2026;19(1):32–44. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19\(1\)-2](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.19(1)-2)

insulation effect of the accumulating sedimentary cover on the formation of the relief of the basins surrounding the ridge. It is shown that neglect for the thermal effect of sedimentation on sea depth in the basins in isostatic models leads to errors of several hundred meters. Estimated sea depths in the Nansen and Amundsen Basins, calculated for lithosphere of different ages, taking into account both the gravitational and thermal effects of sedimentation, are comparable to actual depths. The calculated differences in sea depth at reference points in the central regions of both basins are also close to the actual depths.

**Keywords:** ocean, ridge, Nansen Basin, Amundsen Basin, sedimentation, lithosphere, temperature, phase transition

## **1. Введение**

В открытом океане котловины по обе стороны от спрединговых океанических хребтов располагаются, как правило, практически симметрично относительно их осей. Существенно другая картина наблюдается в строении котловин, окаймляющих хребет Гаккеля, входящего в систему Срединно-Атлантического хребта.

Глубина моря в котловине Нансена (НК) значительно меньше, чем в котловине Амундсена (АК). Это различие, достигающее 1 км и более, отмечают практически все исследователи, работающие в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана [1]. В качестве основной причины этого явления рассматривается, как правило, то, что мощность осадков в котловине Нансена более чем в два раза превосходит мощность в котловине Амундсена. Соответственно, нагрузки осадков на океаническую литосферу и ее погружение в обеих котловинах будут различаться. Тем не менее остается неясным, почему это различие столь велико.

При учете нагрузки осадочного покрова, накапливающегося на океанической литосфере одновременно с ее образованием в оси спрединга, для указанных котловин используют обычную схему изостазии, в которой в выбранном пункте с известным возрастом литосферы в качестве ее мощности принимается значение, соответствующее тому же возрасту литосферы в открытом океане (без осадков) [1]. В такой модели осадконакопление оказывает только гравитационное воздействие на литосферу, как бы уже сформировавшуюся к этому моменту, способствуя ее погружению вместе с осадками и изменению глубины моря. При этом никак не рассматривается влияние накапливающегося осадочного чехла на тепловой режим самой океанической литосферы, приводящего к замедлению остывания и уменьшению мощности последней по сравнению со значением в случае открытого океана. В то же время влияние этого сокращения может быть весьма заметным, так как плотность вещества литосферы намного больше плотности осадков.

Ниже даются оценки совместного гравитационного и теплового влияния осадконакопления, синхронного с образованием океанической литосферы, на эволюцию глубины моря в котловинах Нансена и Амундсена, примыкающих к океаническому хребту Гаккеля.

## **2. Тепловой режим формирующейся океанической литосферы, перекрываемой накапливающимися осадками**

В зоне срединно-океанических хребтов, как известно, постоянно происходит формирование литосферных плит. Под действием сил растяжения (в основном силы втягивания океанической плиты в желоб в зонах субдукции и др.) две плиты, расположенные по обе стороны от хребта, расходятся в стороны. Вследствие этого снизу поднимается горячий мантийный материал (базальтовый расплав) и заполняет образующийся промежуток, создавая вдоль хребта узкое и длинное дайкообразное вертикальное тело, поверхность которого контактирует с морской водой и приобретает ее температуру. Поскольку раздвижение происходит дискретно, с небольшими промежутками между внедрениями, в перерыве между импульсами раздвижения внедрившееся расплавленное вещество охлаждается и затвердевает, образуя тонкую (в секущей хребет вертикальной плоскости) шейку. Когда продолжающие действовать силы растяжения превосходят предел прочности шейки, она разрывается и в литосфере образуется зияние, снова заполняющееся расплавленным базальтом.

По мере раздвижения литосферных плит относительно оси хребта охлаждается и кристаллизуется не только базальтовое вещество из магматических камер, но и базальтовое вещество, существующее в астеносфере в форме частичного расплава. С течением времени процесс остывания захватывает все более глубокие участки астеносферы, за счет чего происходит наращивание мощности океанической литосферы. На больших временных отрезках можно пренебречь дискретностью процесса и считать, что скорость раздвижения плит является постоянной, увеличение мощности литосферы идет непрерывно с увеличением расстояния от оси хребта — конструктивной границы плит. Более холодная океаническая литосфера имеет отрицательную плавучесть в горячей астеносфере и стремится в нее погрузиться. Это погружение растет с увеличением мощности и, следовательно, возраста литосферы. В результате, практически симметрично по обе стороны образующегося срединно-океанического хребта формируются окаймляющие его котловины.

Температура пород везде под плитой (в том числе по всей глубине на оси хребта) равна температуре верхней мантии. Поверхность плиты, как сказано выше, имеет ту же температуру, что и придонная вода. Это означает, что поверхность внедрившейся очень протяженной по простиранию дайки из мантийного вещества, с начальной температурой верхней мантии, скачкообразно приобретает температуру придонной воды. В процессе отодвигания от хребта внутренняя часть дайки охлаждается. Когда снова внедряется разогретое вещество, породы в его ближайшей боковой окрестности, сформировавшиеся в предыдущий акт внедрения, еще не остыли настолько значительно, чтобы латеральный тепловой поток от образующейся дайки был соизмерим с вертикальным. Тепловой поток вдоль дайки практически отсутствует, поскольку заполнение внедрившимся веществом упомянутого зияния происходит одновременно по всей его длине, что обеспечивает одинаковые тепловые условия везде по простиранию дайки и отсутствие теплопереноса вдоль нее. Поэтому, если пренебречь горизонтальным вкrest дайки молекулярным теплопереносом по сравнению с вертикальным, то есть как в теплоизолированной с обеих сторон дайке, то охлаждение этой вертикальной узкой дайки происходит только по вертикали, идентично охлаждению тонкого теплоизолированного с боков стержня при внезапном изменении температуры его верхнего торца. Но охлаждение тонкого и очень длинного теплоизолированного с боков вертикального стержня математически описывается так же, как и охлаждение однородного полупространства под действием внезапного изменения температуры на его границе. Другими словами, в пренебрежении горизонтальным молекулярным теплопереносом поток тепла в отодвигающейся дайке будет идти в вертикальном направлении также, как в модели образования океанической литосферы — модели остывающего полупространства [2].

Если одновременно с образованием океанической литосферы на ее поверхности накапливаются осадки, то тепловой режим в литосфере изменится и для его описания необходимо в общем случае использовать численные методы. Поэтому, поскольку целью настоящей работы является лишь оценка возможных причин существенного различия глубин котловин Нансена и Амундсена, ограничимся следующим рассмотрением.

### 2.1. Тепловые условия в среде

Для простоты будем считать, что теплофизические свойства осадков не меняются по глубине, вещество их минерального скелета, а также поровая вода, несжимаемы.

Процесс формирования осадочного слоя сам по себе приводит к изменению температурного режима основания, подстилающего осадочную толщу. Это обусловлено, с одной стороны, затратами глубинного тепла на прогревание холодных осадков после их выпадения на дне моря, а с другой стороны, экранирующим эффектом осадочного покрова, поскольку теплопроводящие свойства осадочного материала существенно хуже, чем аналогичные свойства кристаллического вещества литосферы. Затраты тепла растут во времени и существенно зависят от мощности осадочного чехла  $h(t)$ . Экранирующий эффект затрудняет отвод тепла из литосферы, что приводит к аномальному разогреву низов осадочной толщи и верхов кристаллической литосферы по сравнению со случаем, когда отсутствуют различия в теплофизических свойствах ее и осадков.

Также будем полагать, что осадочный чехол (среда 0) характеризуется теплопроводностью  $\lambda_0$ , температуропроводностью  $a_0$  и плотностью скелетного вещества  $\rho_{sk}$ . Параметры литосферы (среда 1) и астеносферы (среда 2) обозначим соответственно  $\lambda_1, a_1$  и  $\lambda_2, a_2$ .

Начало координат поместим на поверхность литосферы (подошву осадочного покрова), ось  $z$  направим вверх. В этом случае вся литосфера и астеносфера находятся в области  $z \leq 0$ .

#### 2.1.1 Модель формирования осадочного чехла на одновременно образующейся океанической литосфере

Пористость осадочного материала на уровне  $z$  определяется литостатическим давлением, обусловленным весом вышележащих осадков. Другими словами, пористость  $\phi$  на уровне  $z$  является функцией аргумента  $\tilde{z} = h(t) - z$  и может быть выражена в виде  $\phi(\tilde{z}) = \phi(h(t) - z)$ .

Если известна меняющаяся во времени скорость осадконакопления  $u_s(t)$ , то, учитывая, что в осадочной колонке  $0 \leq z \leq h(t)$  масса минерального скелетного вещества, накопившегося за время  $t$  и испытывавшего уплотнение (пористость  $\phi(\tilde{z})$ ), равна массе того же вещества, накопившегося бы в колонке  $0 \leq z \leq h_0 = \int_0^t u_s(\tau) d\tau$  за то же время, но не испытывавшего сжатия (пористость  $\phi_0$ ), получаем уравнение для нахождения мощности осадочного чехла  $h(t)$  в любой момент времени с начала образования океанической литосферы:

$$h(t) = \int_0^{h(t)} \phi(\tilde{z}) d\tilde{z} + (1 - \phi_0) \int_0^t u_s(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Здесь  $\phi_0$  — пористость на поверхности накапливающихся осадков.

Помимо уплотнения осадочного материала при описании процесса формирования осадочной толщи на океанической литосфере, возникшей в результате полного разрыва континентальной, нужно учитывать, что начальная фаза спрединга часто характеризуется близостью источников сноса осадочного материала (как правило, речных дельт) к оси раздвига и поэтому большой начальной скоростью осадконакопления. С течением времени ось спрединга отодвигается от источников на большее расстояние и до нее доходит меньше осадков в единицу времени. Таким образом, совместное действие уплотнения осадков и удаления оси спрединга от источника их сноса приводит к тому, что для однородного накапливающегося слоя зависимость его мощности от времени графически всегда имеет форму монотонно возрастающей и постепенно выполаживающейся кривой, похожей на график величины, пропорциональной квадратному корню из времени, отсчитанного от начала осадконакопления, или, что то же самое, возраста океанической литосферы.

Подтверждением сказанного может служить рис. 1, где приведены решения уравнения (1) (сплошные линии) и указанные выше аппроксимирующие их зависимости (пунктир)

$$h_s(t) = \alpha_s \sqrt{t}. \quad (2)$$

Для примера скорость осадконакопления  $u_s(t)$  задавалась здесь в виде зависимости:

$$u_s(t) = a \exp(-bt) + c, \quad (3)$$

а пористость  $\varphi(\tilde{z})$  ( $\tilde{z}$  — глубина от поверхности осадочного слоя) задана законом Ати [4]:

$$\varphi(\tilde{z}) = \varphi_0 \exp(-k_s \tilde{z}), \quad (4)$$

здесь:  $k_s$  — коэффициент уплотнения осадка (для терригенного вещества характерны значения  $k_s \approx 0,4 - 0,5 \text{ км}^{-1}$ , если глубина измеряется в километрах).

С учетом здесь изложенного, поскольку выяснение причины сильного различия глубин моря в котловинах Нансена и Амундсена носит, как сказано выше, оценочный характер, ограничимся рассмотрением случая (2), кратко рассмотренного в работе [4].

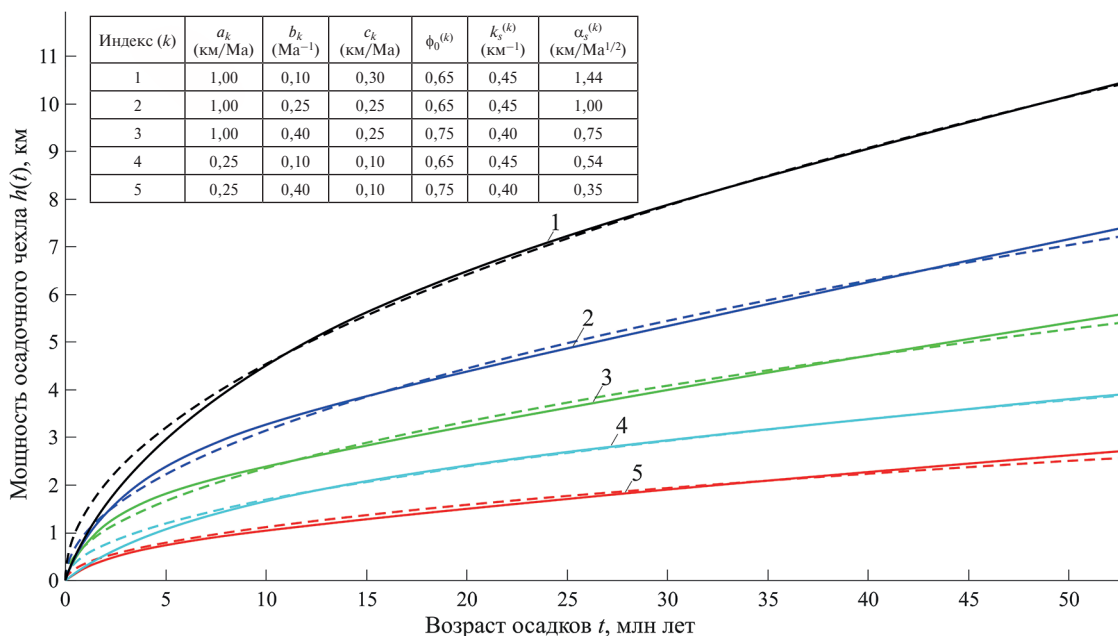


Рис. 1. Пример зависимости мощности  $h(t)$  от возраста осадков. Сплошная линия — решение уравнения (1); пунктир — аппроксимирующая зависимость (2);  $\alpha_s$  — коэффициент в зависимости (2);  $a_k, b_k, c_k$  — коэффициенты в зависимости (3);  $\varphi_0, k_s$  — параметры в законе Ати (4). Ма — млн лет назад

Fig. 1. Example of the dependence of sediment thickness  $h(t)$  on age. The solid line is the solution to equation (1); the dashed line is the approximating dependence (2);  $\alpha_s$  is the coefficient in this approximating dependence;  $a_k, b_k, c_k$  are the coefficients in dependence (3);  $\varphi_0, k_s$  are the parameters in Athy's law (4). Ma — million years ago

### 2.1.2. Вывод основных соотношений

На фазовой границе литосферы и астеносферы (поверхность  $z = \xi(t)$ ) поддерживается постоянная температура фазового перехода  $T_{ph}$ , равная температуре солидуса наиболее плавких пород литосферы (базальтов) и выполняется условие Стефана для кондуктивного теплового потока  $q_j(z, t) = -\lambda_j \partial T_j(z, t) / \partial z (j = 1, 2)$ :

$$q_1|_{z=\xi} - q_2|_{z=\xi} = -L\Delta\rho \frac{d\xi(t)}{dt}, \quad (5)$$

где  $\Delta\rho$  — объемная плотность расплава (в астеносферном веществе), переходящего в твердое состояние;  $L$  — скрытая теплота кристаллизации (энтальпия), равная количеству тепловой энергии, выделяющейся при затвердевании единичной массы расплава.

Не теряя общности, будем считать, что на поверхности осадков поддерживается температура, равная постоянной температуре придонной воды  $T_s$ , а вертикальный тепловой поток в литосфере значительно превосходит латеральный. Таким образом, в рассматриваемой среде осадочный слой (слой с номером 0) занимает область  $0 \leq z \leq h_s(t)$ . Слой с номером 1 — океаническая литосфера, мощность которой изменяется во времени и равна  $H_L(t) = |\xi(t)|$ . Литосфера подстилается астеносферой (слой 2), занимающей полупространство  $z \leq \xi(t)$ .

Температура в каждом слое с номером  $j$  удовлетворяет уравнению теплопроводности:

$$a_j \frac{\partial^2 T_j(z, t)}{\partial z^2} - \frac{\partial T_j(z, t)}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

граничным условиям:

$$\begin{aligned} T_0(z = \alpha_s \sqrt{t}, t) &= T_s; & T_0(z = 0, t) &= T_1(z = 0, t); \\ \lambda_0 \frac{\partial T_0(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \lambda_1 \frac{\partial T_1(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0}; & T_1(z, t) \Big|_{z=\xi(t)} &= T_2(z, t) \Big|_{z=\xi(t)} = T_{ph}; \end{aligned} \quad (7)$$

и начальному условию:

$$T_2(z, t = 0) = T_m. \quad (8)$$

Астеносфера в начальный момент принимается нами изотермичной с надсолидусной температурой, т. е.  $T_m > T_{ph}$ .

Все три слоя нашей среды (осадочный чехол, литосфера и астеносфера) имеют подвижные границы: поверхность чехла и фазовая граница литосфера — астеносфера.

Применяя принцип подобия для уравнения теплопроводности и решая совместно все уравнения (6) с учетом условий (7)–(8), находим выражения для мощности литосферы под осадками

$$H_L(t) = \beta \sqrt{t}, \quad \beta \neq f(t) \quad (9)$$

и температур в каждом из слоев:

$$T_0(z, t) = T_s + (T_{ph} - T_s) \frac{\operatorname{erf}(v) - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_0 t}}\right)}{\operatorname{erf}(v) + \gamma \operatorname{erf}(u)}, \quad z \geq 0, \quad (10)$$

$$T_1(z, t) = T_{ph} - \gamma (T_{ph} - T_s) \frac{\operatorname{erf}(u) + \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_1 t}}\right)}{\operatorname{erf}(v) + \gamma \operatorname{erf}(u)}, \quad -\beta \sqrt{t} \leq z \leq 0, \quad (11)$$

$$T_2(z, t) = T_m - (T_m - T_{ph}) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{|z|}{2\sqrt{a_2 t}}\right)}{\operatorname{erfc}(\sqrt{a_1 / a_2} u)}, \quad z \leq -\beta \sqrt{t}. \quad (12)$$

Здесь:

$$v = \frac{\alpha_s}{2\sqrt{a_0}}, \quad \gamma = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_0}}, \quad u = \frac{\beta}{2\sqrt{a_1}}, \quad (13)$$

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-s^2) ds$  — функция ошибок Гаусса, а  $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-s^2) ds$  — дополнительная функция ошибок Гаусса.

Используя уравнение (5) и равенства (10)–(13), находим уравнение для  $\beta$  или  $u$

$$\gamma \frac{(1 - T_s / T_{ph}) \exp(-u^2)}{\operatorname{erf}(v) + \gamma \operatorname{erf}(u)} - \gamma_1 \frac{(T_m / T_{ph} - 1) \exp(-a_1 / a_2 u^2)}{\operatorname{erfc}(\sqrt{a_1 / a_2} u)} = \mu u, \quad (14)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \quad \mu = \sqrt{\pi} \frac{L \Delta \rho a_1}{\lambda_1 T_{ph}}. \quad (15)$$

Для нашей задачи примем следующие значения параметров:  $T_m = 1350 \text{ }^\circ\text{C} = 1623,15 \text{ K}$  — температура астеносферы, равная температуре ликвидуса базальтов;  $T_{ph} = 1100 \text{ }^\circ\text{C} = 1373,15 \text{ K}$ ;  $T_s = 3 \text{ }^\circ\text{C} = 276,15 \text{ K}$ ;  $L = 400 \text{ кДж/кг}$ ;  $\lambda_1 = 3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ,  $\lambda_2 = 4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $a_1 = a_2 = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_L^0 = 3330 \text{ кг/м}^3$ ;  $\alpha_L = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  — коэффициент объемного теплового расширения литосферного (астеносферного) вещества;  $\Delta \rho = \rho_b \delta_m$ , где  $\rho_b = 2900 \text{ кг/м}^3$  — плотность базальта,  $\delta_m = 0,05$  — доля переходящего в твердое состояние базальтового расплава в единичном объеме вещества;  $\rho_w = 1032 \text{ кг/м}^3$  — плотность морской воды при ее солёности 35 ‰.

Теплопроводность осадочного вещества  $\lambda_s$  в точке  $z$  находится из модели эффективной среды [5] при  $\lambda_{sk} = 2,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  — теплопроводность минерального скелета осадочного вещества,  $\lambda_w = 0,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  — теплопроводность поровой воды.

Температуропроводность  $a_s$  осадочного вещества в точке  $z$  определяется как

$$a_s = \frac{\lambda_s}{\rho \overline{C_s}} = \frac{\lambda_s}{(1 - \varphi) \rho_{sk} C_{sk} + \varphi \rho_w C_w}, \quad (16)$$

где  $\rho_{sk}$ ,  $C_{sk}$  — плотность и теплоемкость скелетного вещества,  $\rho_w$ ,  $C_w$  — то же у воды.

Поскольку в нашей модели принимается, что теплофизические свойства осадков не изменяются с глубиной под дном, будем использовать их средние значения по  $z$  для каждого слоя мощностью  $h_s^{(m)} = \alpha_s \sqrt{t_m}$ , где  $t_m$  — максимальная рассматриваемая продолжительность осадконакопления. То есть среднее на интервале  $0 \leq z \leq h_s^{(m)}$  значение, обозначаемое чертой над соответствующим символом, равно, например, для  $\rho_s$ :

$$\overline{\rho_s} = \frac{1}{h_s^{(m)}} \int_0^{h_s^{(m)}} \rho_s(z) dz, \quad (17)$$

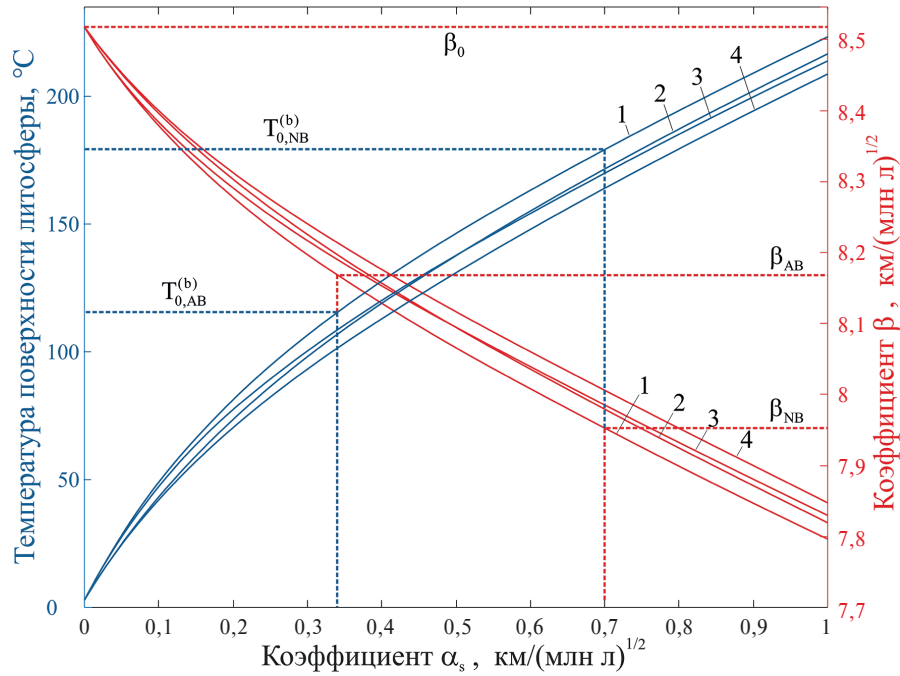
а средние  $\overline{\varphi}$ ,  $\overline{\rho C_s}$ ,  $\overline{\lambda_s}$ ,  $\overline{a_s}$  определяются аналогичным путем.

В рамках принятой модели температура (обозначим ее как  $T_0^{(b)}$ ) на подошве осадочной толщи, в числе других параметров среды, зависит от коэффициента  $\alpha_s$ . В соответствии с выражением (10) при  $z = 0$  эта температура не изменяется с возрастом литосферы (и осадочного чехла) и равна

$$T_0^{(b)} = T_0(0, t) = T_1(0, t) = T_s + (T_{ph} - T_s) \frac{\operatorname{erf}(v)}{\operatorname{erf}(v) + \gamma \operatorname{erf}(u)} \neq f(t). \quad (18)$$

Как следует из рис. 2 с ростом значений  $\alpha_s$  температура на поверхности литосферы, вследствие теплоизолирующего влияния накапливающихся осадков на тепловой режим литосферы, может достигать первых сотен градусов Цельсия, что свидетельствует об ухудшении условий ее остывания и, в конечном итоге, о замедлении роста ее мощности во времени. При этом зависимость температуры  $T_0^{(b)}(\alpha_s)$  от свойств материала осадочного чехла нельзя назвать сильной. Максимальное относительное расхождение между значениями  $T_0^{(b)}(\alpha_s)$  в интервалах возможного изменения указанных величин ( $0,65 \leq \varphi_0 \leq 0,75$  и  $0,4 \leq k_s \leq 0,5 \text{ км}^{-1}$ ) не превосходит ~16 %.

В нашей модели показателем степени остывания литосферы под осадками и уменьшения ее мощности является изменение величины коэффициента  $\beta(\alpha_s)$  относительно его значения  $\beta(\alpha_s = 0)$ , то есть при отсутствии осадков. Рис. 2 наглядно демонстрирует это уменьшение с возрастанием коэффициента  $\alpha_s$ , что эквивалентно сокращению мощности литосферы при увеличении мощности осадков  $h_s(t)$ . При  $\alpha_s = 0$  коэффициент  $\beta(0) \approx 8,52 \text{ км/(млн лет)}^{1/2}$ . Он характеризует мощность литосферы в открытом океане (без осадков). Зависимость коэффициента  $\beta(\alpha_s)$  от свойств осадков в чехле невелика с максимальным относительным расхождением его значений меньше 1 % в указанном интервале изменения параметров осадков.



**Рис. 2.** Температура  $T_0^{(b)} = T_1(0, t)$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) на поверхности литосферы и коэффициент  $\beta$  как функции от коэффициента  $\alpha_s$ . Графики и шкала в синих тонах —  $T_0^{(b)}/\alpha_s$  в красных —  $\beta(\alpha_s)$ . Параметры осадков: 1)  $\varphi_0 = 0,75, k_s = 0,4 \text{ км}^{-1}$ ; 2)  $\varphi_0 = 0,65, k_s = 0,4 \text{ км}^{-1}$ ; 3)  $\varphi_0 = 0,75, k_s = 0,5 \text{ км}^{-1}$ ; 4)  $\varphi_0 = 0,65, k_s = 0,5 \text{ км}^{-1}$

**Fig. 2.** Temperature  $T_0^{(b)} = T_1(0, t)$  (in  $^{\circ}\text{C}$ ) at the lithosphere surface and the coefficient  $\beta$  as functions of the coefficient  $\alpha_s$ . Graphs and scale in blue tones —  $T_0^{(b)}/\alpha_s$  in red —  $\beta(\alpha_s)$ . Sediments parameters: 1)  $\varphi_0 = 0,75, k_s = 0,4 \text{ км}^{-1}$ ; 2)  $\varphi_0 = 0,65, k_s = 0,4 \text{ км}^{-1}$ ; 3)  $\varphi_0 = 0,75, k_s = 0,5 \text{ км}^{-1}$ ; 4)  $\varphi_0 = 0,65, k_s = 0,5 \text{ км}^{-1}$

## 2.2. Погружение литосферы с осадками и глубина океана

С увеличением возраста литосферы ее мощность и вес вертикальной колонки с единичным горизонтальным сечением и высотой, равной этой мощности, возрастают и она испытывает погружение в менее плотную и менее вязкую астеносферу. Если литосфера перекрывается осадочной толщей, то под ее весом литосфера испытывает дополнительное погружение. Глубина океана  $\Delta h$  относительно вершины хребта также изменяется. При этом в зависимости от мощности осадочной толщи (или коэффициента  $\alpha_s$ ) и свойств осадков величина  $\Delta h$  либо положительна, то есть дно моря погружается относительно вершины хребта, либо отрицательна, когда мощность осадочного слоя настолько велика, что поверхность осадков находится выше уровня вершины хребта. Исследуем эти изостатические условия.

На расстоянии от оси спрединга, соответствующем возрасту  $t$  литосферы, выберем тонкую вертикальную колонку с верхним торцом, расположенным в водном слое на уровне вершины хребта. Нижний торец колонки размещается на границе литосфера–астеносфера, т. е. на глубине  $\Delta h(t) + h_s(t) + H_L(t)$  от вершины хребта. Сравнивая литостатическое давление здесь и на том же уровне на оси спрединга (в вязкой жидкости — астеносфере) находим  $(\rho_w \Delta h + \bar{\rho}_s h_s + \bar{\rho}_L H_L)g = \rho_a g(\Delta h + h_s + H_L)$  ( $g$  — ускорение свободного падения), откуда получаем выражение для приращения  $\Delta h(t)$  за счет погружения литосферы вместе с осадочным слоем при учете как его веса, так и его влияния на остывание литосферы:

$$\Delta h(t) = \frac{\bar{\rho}_L - \rho_a}{\rho_a - \rho_w} H_L(t) - \frac{\rho_a - \bar{\rho}_s}{\rho_a - \rho_w} h_s(t). \quad (19)$$

Здесь:  $\rho_a = \rho_L^0(1 - \alpha_L T_m)$  — плотность астеносферного вещества на оси спрединга;  $\rho_w$  — плотность морской воды. Средняя плотность литосферы  $\bar{\rho}_L$  равна

$$\bar{\rho}_L(t) = -\frac{1}{\xi(t)} \int_{\xi(t)}^0 \rho_L(z,t) dz, \quad (20)$$

где  $\rho_L(z, t)$  — плотность вещества литосферы в точке  $z$ , зависящая от температуры в этой точке, то есть

$$\rho_L(z, t) = \rho_L^0 [1 - \alpha_L T_1(z, t)], \quad (21)$$

$\rho_L^0$  — начальная плотность вещества литосферы и астеносферы;  $\alpha_L$  — коэффициент объемного теплового расширения этого вещества.

Подставляя выражение (21) в уравнение (20), находим:

$$\bar{\rho}_L(t) = \rho_L^0 [1 - \alpha_L \bar{T}_L(t)], \quad (22)$$

где  $\bar{T}_L(t)$  — средняя температура литосферы, перекрытой осадочной толщей. Принимая во внимание выражение (11) для  $T_1(z, t)$ , эта средняя температура не изменяется с возрастом:

$$\bar{T}_L(t) = -\frac{1}{\xi(t)} \int_{\xi(t)}^0 T_1(z,t) dz = T_{ph} - \frac{\gamma(T_{ph} - T_s) [1 - \exp(-u^2)]}{\sqrt{\pi} u [\operatorname{erf}(v) + \gamma \operatorname{erf}(u)]} = \bar{T}_L \neq f(t). \quad (23)$$

С учетом уравнений (2), (9) и (22) выражение (19) для глубины океана относительно гребня хребта принимает следующий вид

$$\Delta h(t) = \kappa \sqrt{t}, \quad (24)$$

где

$$\kappa = \kappa_L - \kappa_s, \quad \kappa_L = \rho_L^0 \alpha_L \frac{T_m - \bar{T}_L}{\rho_a - \rho_w} \beta, \quad \kappa_s = \frac{\rho_a - \bar{\rho}_s}{\rho_a - \rho_w} \alpha_s. \quad (25)$$

Как следует из (24, 25), если  $\kappa_s = \kappa_L$ , то происходит полная компенсация осадками погружения литосферы. Если  $\kappa_s > \kappa_L$ , то  $\Delta h(t) < 0$  и поверхность осадков располагается выше уровня вершины хребта.

Зависимость  $\kappa$  от  $\alpha_s$  приведена на рис. 3, а. На врезке к этому рисунку для каждого графика указываются соответствующие ему значения параметров осадочного материала, а также значения  $\alpha_s$ , при которых достигается полная компенсация осадками погружения литосферы, т. е.  $\kappa(\alpha_s) = 0$ . Рис. 3, а демонстрирует заметную чувствительность глубины  $\Delta h(t)$  к используемым при вычислениях значениям параметров осадков. Если не учитывать воздействие накапливающегося осадочного чехла на тепловой режим океанической литосферы, то есть считать, что под осадками находится такая же литосфера, как в условиях открытого океана, то, составляя подобные (19) изостатические равенства, получаем выражение для глубины океана  $\Delta h_0(t)$  относительно гребня хребта. Именно:

$$\Delta h_0(t) = \kappa_0 \sqrt{t}, \quad (26)$$

где

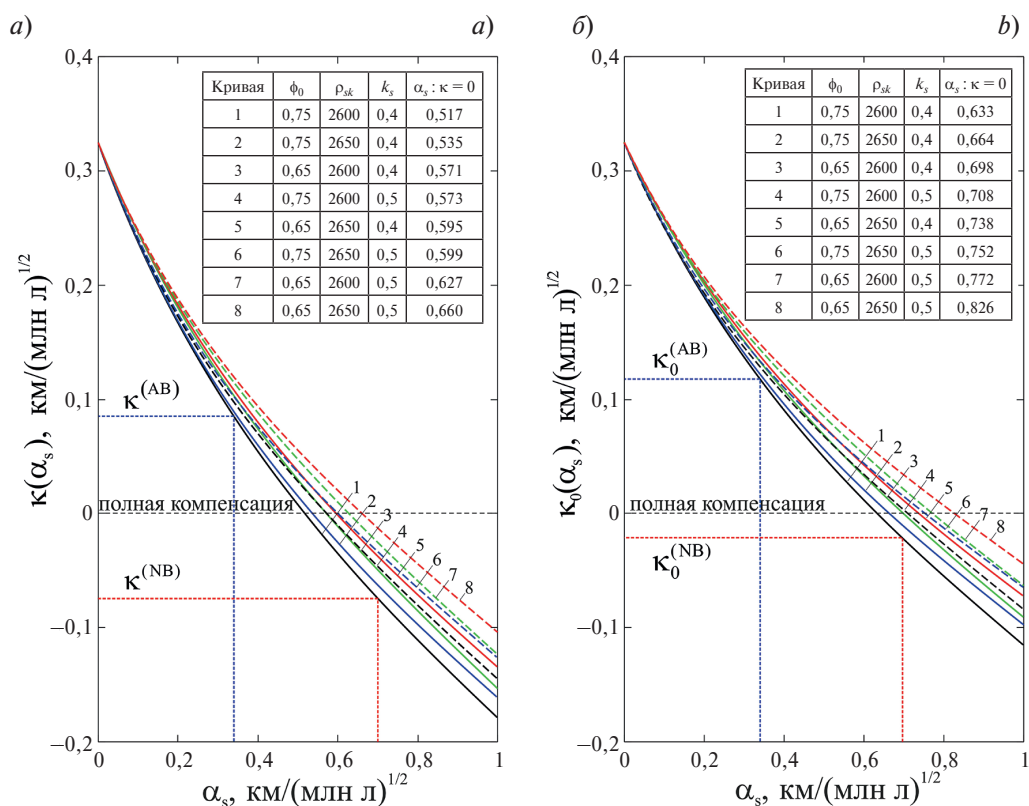
$$\kappa_0 = \kappa_L^0 - \kappa_s, \quad \kappa_L^0 = \rho_L^0 \alpha_L \frac{T_m - \bar{T}_L^0}{\rho_a - \rho_w} \beta_0, \quad (27)$$

а  $\kappa_s$ , как и раньше, определяется уравнением из (25),  $\beta_0 = \beta(\alpha_s = 0)$ ,  $\bar{T}_L^0 = \bar{T}_L(\alpha_s = 0)$ .

Зависимость  $\kappa_0(\alpha_s)$  демонстрируется на рис. 3, б. На врезке к этому рисунку для каждого графика также указываются соответствующие ему значения параметров осадочного материала и значения  $\alpha_s$ , при которых достигается полная компенсация погружения литосферы. Как следует из рис. 3, б, коэффициенты  $\kappa_0(\alpha_s)$  превосходят по величине коэффициенты  $\kappa(\alpha_s)$ , свидетельствуя о большей глубине океана с осадками без учета их теплового влияния на литосферу. Особенно это различие заметно, начиная с  $\alpha_s > 0,3$ , что говорит о заметно большем погружении поверхности литосферы, а следовательно, и морского дна, так как мощность осадков в обоих случаях одинакова. Из этого рисунка видно также, что влияние свойств осадочного материала ( $\rho_0$ ,  $\kappa_s$ ,  $\rho_{sk}$ ) на характер изменения  $\kappa_0(\alpha_s)$  качественно такое же, как и влияние на  $\kappa(\alpha_s)$ .

### 3. Об эволюции глубины моря в котловинах Нансена и Амундсена, примыкающих к хребту Гаккеля

Используя полученные выше результаты, оценим причины существенно больших глубин моря в котловине Амундсена по сравнению с глубинами в котловине Нансена. Для этого рассмотрим глубинный сейсмический разрез вдоль профиля МОВ 2014–07 [6], пересекающего обе эти котловины перпендикулярно оси спрединга (рис. 5).



**Рис. 3.** Коэффициент  $\kappa$  как функция от коэффициента  $\alpha_s$ : *a* — с учетом влияния осадконакопления на формирование океанической литосферы; *b* — без учета этого влияния;  $\alpha_s: \kappa = 0$  — такое значение  $\alpha_s$ , что  $\kappa = 0$ , т. е. при полной компенсации осадками погружения литосферы

**Fig. 3.** Coefficient  $\kappa$  as a function of coefficient  $\alpha_s$ : *a* — taking into account the influence of sedimentation on the formation of the oceanic lithosphere; *b* — ignoring this influence;  $\alpha_s: \kappa = 0$  — a value  $\alpha_s$  such that  $\kappa = 0$ , i. e. with complete compensation for the subsidence of the lithosphere by sediments

В океанической литосфере, в том числе перекрытой осадками, как правило (вдали от трансформных разломов и зон субдукции), действуют только напряжения растяжения, а потому естественно ожидать, что в обрамляющих медленноспрединговый хребет Гаккеля котловинах слои, составляющие осадочный покров, будут залегать практически горизонтально. Однако такая картина не является здесь повсеместной.

В котловине Нансена (НК), как следует из рис. 5, примерно до отметки 500 км на профиле все сейсмические границы на разрезе, включая дно моря, испытывают значительный подъем в южном направлении. Причем подъем происходит не только в пределах пассивной континентальной окраины, но и над наиболее древней частью литосферы океана. Это можно объяснить тем, что образующаяся океаническая литосфера в начальный момент сразу после разрыва континентальной приваривается к последней, затем утолщается, остывая и оставаясь с ней непрерывно соединенной. Поскольку плотность пород континентальной литосферы, существенно уступает плотности пород, слагающих океаническую, континентальная литосфера, обладая высокой положительной плавучестью в астеносфере, препятствует нормальному погружению края (наиболее древней части) океанической литосферы, плавучесть которой в астеносфере отрицательна, а мощность увеличивается с возрастом. В то же время под действием нагрузки утолщающейся океанической литосферы краевая часть континентальной испытывает дополнительное погружение относительно ее положения в момент разрыва, влияя на условия осадконакопления и наклон осадочных границ. С удалением от континентальной окраины ее влияние на характер погружения океанической литосферы должно убывать.

К северу от указанного на профиле пункта 500 км самые нижние, как нам представляется, сейсмические границы становятся субгоризонтальными. После отметки  $\approx 520$  соответствующей положению оси полосовой магнитной аномалии 20 (возраст литосферы 44 млн лет), эти границы далее не прослеживаются.

С учетом вышесказанного на оси линейной магнитной аномалии 20 в котловине Нансена выберем в качестве подошвы осадочного чехла точку на глубине  $h_b \approx 8,1$  км, обведенную квадратом на рис. 5. Глубина моря на этой оси составляет  $h_w \approx 3,4$  км, откуда получаем значение мощности осадочного покрова, примерно равное  $h_s = h_b - h_w \approx 4,7$  км. Так как возраст океанической литосферы, как указано выше, составляет  $t = 44$  млн

лет, находим значение коэффициента  $\alpha_s = \alpha_s^{(HK)} \approx 0,7$  км/(млн лет)<sup>1/2</sup>, в аппроксимирующей зависимости (2) для мощности осадочного слоя как функции от возраста океанической литосферы.

В котловине Амундсена (АК) аналогичная картина, хотя и в меньшей степени, чем в котловине Нансена, отмечается севернее пункта профиля ~900 км, когда все отражающие границы, исключая дно моря, остающегося здесь практически горизонтальным, испытывают подъем по мере приближения к хребту Ломоносова с его континентальной литосферой.

На оси правой линейной магнитной аномалии 20 глубина моря составляет  $h_w \approx 4,3$  км, а подошва осадочного покрова располагается на глубине  $h_b \approx 6,6$  км. Таким образом, мощность осадков равна  $h_s = h_b - h_w \approx 2,3$  км, что при том же  $t = 44$  млн лет соответствует значению коэффициента  $\alpha_s = \alpha_s^{(AK)} \approx 0,34$  км/(млн лет)<sup>1/2</sup> в аппроксимирующей зависимости (2).

Для параметров осадков в обеих котловинах выберем характерные для терригенного заполнения осадочных бассейнов значения:  $\rho_{sk} = 2600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varphi_0 = 0,75$ ,  $k_s = 0,4$  км<sup>-1</sup>. Величина пористости  $\varphi_0$  на дне моря обосновывается и используется в работе [1].

Используя полученные значения коэффициентов  $\alpha_s^{(HK)}$  и  $\alpha_s^{(AK)}$ , находим, что в соответствии с рис. 2 уменьшение коэффициента  $\beta(\alpha_s)$  с ростом  $\alpha_s$  от  $\beta(0)$  (в открытом океане) до  $\beta(\alpha_s^{(HK)})$  в котловине Нансена составляет  $\Delta\beta = 0,75$  км/(млн лет)<sup>1/2</sup>. Если возраст литосферы равен  $t = 53$  млн лет (предполагаемое время раскрытия океана в центральной области Евразийского бассейна), то литосфера под осадками в котловине Нансена будет на  $\Delta\beta\sqrt{t} \approx 4,15$  км тоньше, чем литосфера в открытом океане. При коэффициенте  $\beta(\alpha_s^{(ФЛ)})$  имеем для котловины Амундсена  $\Delta\beta = 0,35$  км/(млн лет)<sup>1/2</sup> и на том же возрасте ее мощность меньше соответствующего значения в открытом океане на  $\Delta\beta\sqrt{t} \approx 2,55$  км.

Оценка степени теплового влияния осадконакопления на литосферу при  $\alpha_s = \alpha_s^{(HK)}$  и  $t = 53$  млн лет, показывает, что в котловине Нансена глубина моря меньше примерно на 350–400 м, чем в случае океана с таким же осадочным покровом, но без учета этого воздействия на литосферу (различие между  $\kappa(\alpha_s)$  и  $\kappa_0(\alpha_s)$  на рис. 3!). В котловине Амундсена при  $\alpha_s = \alpha_s^{(AK)}$  аналогичная величина составляет примерно 240 м.

Основные параметры океанической литосферы в обеих котловинах, вычисленные в рамках принятой нами зависимости (2) мощности осадочного покрова от возраста литосферы, представлены в таблице.

Таблица

Table

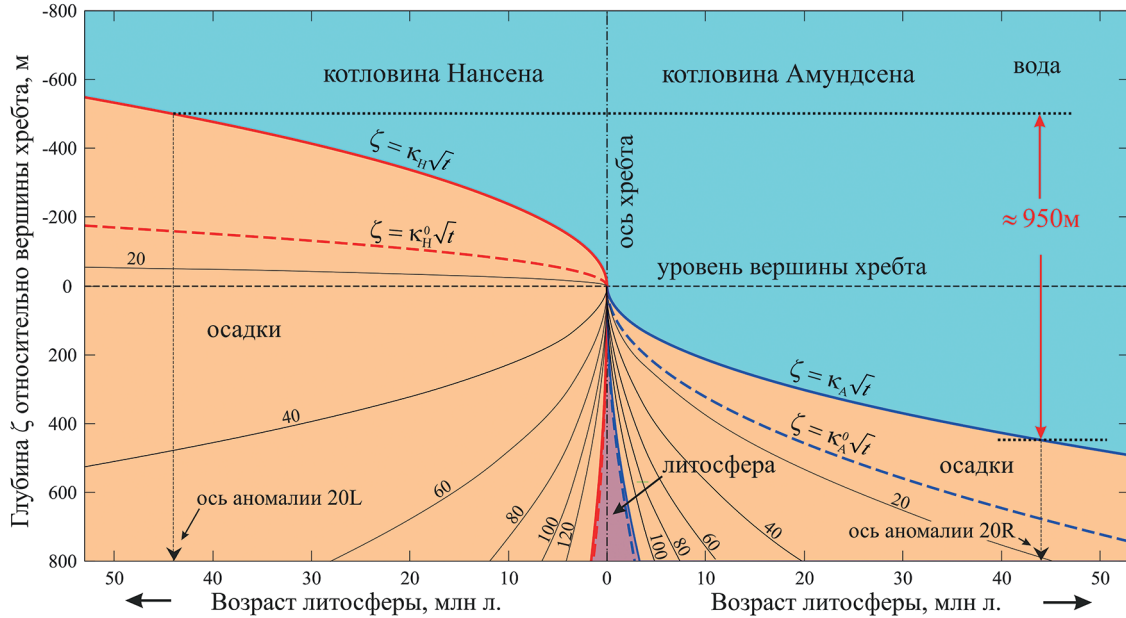
Параметры литосферы

Lithosphere parameters

Котловина	$\beta$ км/(млн лет) <sup>1/2</sup>	$H_L^{(max)}$ км	$\bar{T}_L$ К/°С	$T_0(0, t)$ К/°С	$\beta_0$ км/(млн лет) <sup>1/2</sup>	$H_L^{(max)}$ км	$\bar{T}_L$ К/°С
НК	7,95	57,9	959/685	463/179	8,52	62	887/614
АК	8,17	59,5	932/659	388/115	8,52	62	887/614

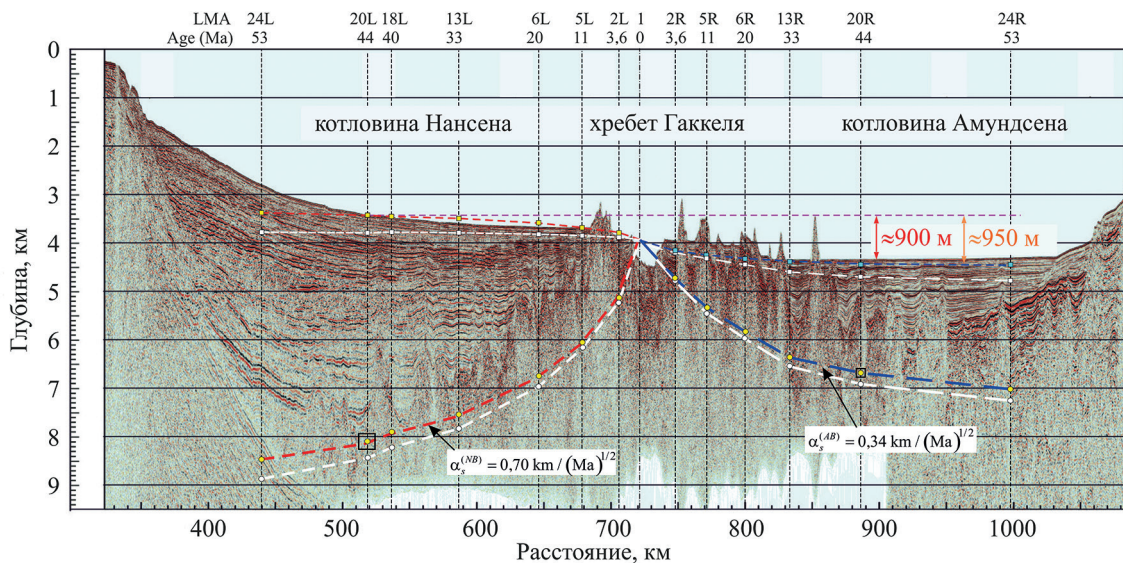
Как следует из приведенной таблицы, в рамках принятой нами модели среды средняя температура литосферы  $\bar{T}_L = \bar{T}_L^{(HK)}$  под котловиной Нансена больше  $\bar{T}_L^{(AK)}$  на 26 К, тогда как температура на подошве осадочного слоя в котловине Нансена превосходит аналогичную в котловине Амундсена на 64 К. В то же время максимальная мощность  $H_L^{(max)}$  (на возрасте 53 млн лет) в котловине Амундсена превышает мощность одновозрастной литосферы в котловине Нансена на 1,6 км. Поскольку плотность литосферного вещества существенно превосходит среднюю плотность осадков, литосфера в котловине Амундсена погружается в астеносферу на большую глубину, чем в котловине Нансена, несмотря на существенно большую мощность и среднюю плотность осадочного покрова в последней. Это приводит к разной степени погружения литосферы с перекрывающими ее осадками или, что то же самое, приращению глубины моря относительно гребня хребта Гаккеля в обеих котловинах. Этот вывод наглядно подтверждается зависимостью вычисленных, используя выражения (24, 26), значений  $\zeta = \Delta h(t)$  и  $\zeta = \Delta h_0(t)$ , графики которых приведены на рис. 4.

Значения вычисленных глубин как дна, так и подошвы осадочного покрова вынесены на тот же глубинный сейсмический разрез вдоль профиля МОВ 2014-07 (рис. 5) [6]. Как следует из этого рисунка, наши оценочные глубины моря как в котловине Нансена, так и в котловине Амундсена, вычисленные с учетом не только гравитационного, но и теплового влияния осадконакопления, сопоставимы с реально существующими вполне удовлетворительно. Перепады глубин моря в точках с возрастом литосферы в 44 млн лет в обеих котловинах, вычисленные («оранжевые») и реальные («красные»), также близки.



**Рис. 4.** Изменение вычисленной глубины океана  $\zeta(t)$  относительно вершины хребта. Красные линии соответствуют котловине Нансена, синие — Амундсена. Пунктир — глубины без учета влияния осадконакопления на формирование океанической литосферы, тонкие линии с индексами — изолинии температуры и ее значения в  $^{\circ}\text{C}$

**Fig. 4.** Change in calculated ocean depth  $\zeta(t)$  relative to the ridge crest. The red lines correspond to the Nansen Basin, and the blue lines to the Amundsen Basin. The dotted lines represent depths excluding the influence of sedimentation on the formation of the oceanic lithosphere, the thin lines with indices are temperature isolines and their values in  $^{\circ}\text{C}$



**Рис. 5** Изменение вычисленной и фактической глубины океана относительно вершины хребта. Красные линии соответствуют котловине Нансена; синие Амундсена. Тонкий пунктир — вычисленная глубина моря относительно вершины хр. Гаккеля; жирный пунктир — подошва осадочного чехла. Белый пунктир — такие же поверхности, но без учета теплового влияния процесса осадконакопления. LMA — линейные магнитные аномалии, их номера и возраст

**Fig. 5.** Change in calculated and actual ocean depths relative to the ridge top. The red lines correspond to the Nansen Basin; the blue lines to the Amundsen Basin. The thin dotted line is the calculated sea depth relative to the Gakkel Ridge crest; the thick dotted line is the base of the sedimentary cover. The white dotted line represents the same surfaces, but without taking into account the thermal influence of sedimentation. LMA are linear magnetic anomalies, their numbers, and ages

#### 4. Выводы

Несмотря на то, что выполненное исследование является оценочным и осуществлялось на примере одного сейсмического разреза с использованием приближенной модели формирования осадочного чехла в котловинах, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Глубины моря в котловинах Нансена и Амундсена, вычисленные для литосферы различного возраста с учетом как гравитационного, так и теплового влияния осадконакопления, вполне удовлетворительно сопоставимы с реально существующими. Расчетные перепады глубин моря в опорных точках в центральных областях обеих котловин весьма близки к реальным.

2. Выполненное моделирование образования океанической литосферы, перекрываемой накапливающимися осадками, в Евразийском бассейне Ледовитого океана с учетом как гравитационного, так и теплового влияния процесса осадконакопления показывает, что наблюдаемое различие глубин в котловинах Нансена и Амундсена действительно определяется мощностями их осадочных покровов и является вполне закономерным.

3. Использование только гравитационного, без учета теплового, влияния осадконакопления в изостатических схемах определения глубины моря может привести к ошибкам, составляющим несколько сотен метров, поскольку сам процесс осадконакопления изменяет режим остывания океанической литосферы, и поэтому уменьшает ее мощность.

4. Процесс осадконакопления влияет не только на тепловой режим океанической литосферы, но и на распределение температуры в самом осадочном чехле. Это должно обязательно учитываться при расчете индексов зрелости океанических осадков для генерации углеводородов и определения областей нефтегазообразования.

#### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0028).

#### Funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0028).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

#### Литература

1. *Jokat W., Micksch U.* Sedimentary structure of the Nansen and Amundsen basins, Arctic Ocean // *Geophysical research letters*. 2004. Vol. 31, L02603. <https://doi.org/10.1029/2003GL018352>
2. *Сорохтин О.Г.* Зависимость топографии срединно-океанических хребтов от скорости раздвижения дна океана // Доклады АН СССР. 1973. Т. 208. С. 1338–1341.
3. *Athy L.F.* Density, porosity and compaction of sedimentary rocks // *AAPG Bul.* 1930. No. 14. P. 1–24.
4. *Бацанин С.Ф., Гольмиток А.Я.* О тепловой эволюции океанической литосферы в условиях осадконакопления // *Океанология*. 1986. Т. 26, № 3. С. 654–658.
5. *Allen P.A., Allen J.R.* Basin analysis. Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1990. 451 p.
6. Арктический бассейн (геология и морфология) / Ред. В.Д. Каминский. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. 291 с.

#### References

1. Jokat W, Micksch U. Sedimentary structure of the Nansen and Amundsen basins, Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. 2004;31: L02603. <https://doi.org/10.1029/2003GL018352>

2. Sorokhtin OG. Dependence of the mid-ocean ridges topography on the ocean floor spreading rate. *Report of the USSR Academy of Sciences*. 1973;208:1338–1341.
3. Athy LF. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. *AAPG Bulletin*. 1930;14:1–24.
4. Batsanin SF, Golmshtok AYа. On the thermal evolution of the oceanic lithosphere under sedimentation conditions. *Oceanology*. 1986;26(3):654–658.
5. Allen PA, Allen JR. Basin analysis. Oxford: Blackwell Scientific Publications; 1990. 451 p.
6. Kaminsky VD, editor. Arctic Basin (geology and morphology). St. Petersburg: VNIIOkeangeologia; 2017. 291 p. (In Russ.).

#### **Об авторах**

ГОЛЬМШТОК Александр Яковлевич, кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, Scopus AuthorID: 6602613595, SPIN-код (РИНЦ): 8068-9293, e-mail: golmshtok@gmail.com

ПИСКАРЕВ Алексей Лазаревич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ВНИИОкеангеология, профессор СПбГУ — Институт наук о Земле, ORCID: 0000-0002-6957-0242, e-mail: apiskarev@gmail.com