

УДК 539.37; 551.24

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ КАК ИСТОЧНИКА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

В. П. Корячко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой САПР ВС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/ 0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

В. А. Минаев, д.т.н., профессор, профессор кафедры специальных информационных технологий
МосУ МВД России, Москва, Россия;

orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: m1va@yandex.ru

Р. О. Степанов, к.т.н., доцент, проректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

orcid.org/0000-0001-9124-5924, e-mail: stepanovr@bmstu.ru

А. О. Фаддеев, д.т.н., доцент, профессор кафедры экономической безопасности МосУ МВД России,
Москва, Россия;

orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

В статье рассматривается проблема оценки температурного режима на различных глубинах земной коры, измерение которого прямыми методами невозможно, а известные косвенные методы сложны в реализации. Целью работы является построение математической модели температурного режима литосферы, решения которой позволили количественно оценить напряжения и смещения, формирующиеся в геологической среде вследствие комплексного воздействия на неё тектонических и термических процессов. Представлены результаты количественных оценок термоупругих деформаций в поверхностных слоях земной коры применительно к Арктической криолитозоне Российской Федерации. На основании результатов моделирования построены поля распределений температуры, а также выполнены численные оценки смещений и термоупругих деформаций в поверхностных слоях земной коры как для всей южной Якутии, так и для окрестностей Якутска. Сделан важный вывод о том, что представленные модели дают возможность на принципиально новой технологической основе осуществлять мониторинг зданий, инженерных сооружений и их грунтовых оснований, в том числе – в условиях криолитозоны, разрабатывать обоснованные рекомендации по условиям безопасного строительства как отдельных объектов, так и их комплексов, а также управлять самой процедурой строительства на различных по своему масштабу территориях.

Ключевые слова: Арктика, криолитозона, моделирование, геологическая среда, температурный режим, термоупругие деформации, мониторинг.

DOI:10.21667/1995-4565-2023-83-72-83

Введение

Появившаяся в конце прошлого столетия теория тектоники литосферных плит вытеснила существующее представление о факторах смещений и деформаций земной коры, отведя главную роль в их генерации тепловой конвекции в астеносфере. Согласно многочисленным публикациям теплоперенос в глубинах Земли, инициируемый разностью температур, является главным геодинамическим механизмом эволюции планеты [1-6].

Между тем информация о температурном режиме на различных глубинах в земной коре и для разных регионов планеты либо неоднозначна, либо её недостаточно, или она отсутствует. Это во многом связано с отсутствием эффективных прямых методов оценки реального распределения температуры в глубоких недрах Земли.

Все же известные косвенные методы непросты в реализации, позволяя восстановить температурный режим глубоких недр при условии задания исходной температуры на некоторой глубине в верхней части более или менее однородной мантии. Основную информацию о тепловом режиме литосферы даёт геотермический метод, основанный на изучении распределе-

ния по поверхности Земли плотности теплового потока и восстановления температуры в недрах путём решения обратной задачи для уравнения теплопроводности.

Именно поэтому сегодня широкий размах приобрели региональные исследования теплового потока и поиски связей термических параметров с различными геолого-геофизическими структурами, в особенности – с тектоническими [1, 7].

Так, в частности, в рамках исследования особенностей теплового режима литосферы и мантии Земли возможно решение важнейшей проблемы современной геодинамики – обоснование физического механизма, способного объяснять масштабы, скорость и амплитуды новейших поднятий в кратонных областях, представляющих собой стабильные части континентальной литосферы, и опусканий, приводящих к образованию осадочных бассейнов [1, 8].

Зависимость между тепловым потоком и вертикальными движениями земной коры рассматривалась рядом исследователей [9, 10], которые указывали, что одной из причин возникновения землетрясений могут являться термоупругие напряжения, формирующиеся в земной коре в результате изменений температуры земных недр во времени и пространстве [5].

В последнее время вследствие возрастания роли Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) во многих стратегически значимых направлениях развития и укрепления Российского государства усилия наших исследований акцентированы на создании технологии минимизации рисков геодинамического, техногенного и антропогенного происхождения для этих территорий [11, 12].

АЗРФ характеризуется как достаточно активная в геодинамическом отношении, поэтому необходимы превентивные оценки рисков геодинамического происхождения, которые позволяют построить стратегию управления безопасным развитием этого региона.

Поскольку информация о пространственном распределении температурного поля литосферы является определяющей при оценке многих (если не всех) количественных характеристик параметров литосферных геодеформационных процессов [13, 14], представим подход к моделированию температурного поля по всей глубине земной коры. Численные оценки температуры на различных глубинах необходимы для создания математической модели термоупругого деформирования литосферы, этапы построения которой изложены в настоящей работе. В завершение изложим некоторые важные результаты выполненных количественных оценок термоупругих деформаций в поверхностных слоях земной коры исследуемого региона, а также определим ближайшие перспективы исследований Арктической криолитозоны, включая нарастающую проблему её нарушения в широтном и глубинном аспектах вследствие изменения планетарных тепловых потоков.

Теоретические исследования

Достаточно достоверно определённой величиной, характеризующей тепловые потери Земли, является поток, связанный с теплопроводностью. Поэтому при оценке температуры верхних частей планеты будем считать, что весь перенос тепла осуществляется только процессами теплопроводности.

При осуществлении оценок используем уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + A(x, y, z, t), \quad (1)$$

где ρ – плотность, c – теплоёмкость, T – температура, k – коэффициент теплопроводности, A – генерация тепла в единице объёма, t – время.

Используя ряд упрощений, приближений и предположений, получаем выражение для зависимости температуры от глубины z для континентальной части:

$$T(z) = \frac{C_1 A_0}{\alpha} \cdot \sum_{m=0}^6 D_m \cdot \frac{z^{m+1}}{m+1} + \frac{C_2}{b} \cdot \ln(a + bz) + C_3, \quad (2)$$

где D_m – коэффициенты разложения температуры в ряд по степеням z ; a , b – некоторые постоянные; C_1 , C_2 , C_3 – коэффициенты, определяемые через граничные условия в соответствии с соотношениями:

$$T(z)|_{z=0} = T_0; k_0 T'(z)|_{z=0} = Q_0; T(z)|_{z=H} = T_H, \quad (3)$$

где T_0 , Q_0 , k_0 – температура, тепловой поток и коэффициент теплопроводности соответственно на дневной поверхности, а T_H – температура на границе литосфера – литосферная мантия.

Подставляя (2) в граничные условия (3), находим коэффициенты C_1 , C_2 , C_3 :

$$\left\{ \begin{aligned} C_1 &= \frac{\alpha(T_H - T_0) - \frac{\alpha a Q_0}{b k_0} \cdot \ln \frac{a + bH}{a}}{A_0 \left[\sum_{m=0}^6 D_m \cdot \frac{H^{m+1}}{m+1} - \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{a + bH}{a} \right]}; \quad C_2 = \frac{a Q_0}{k_0} - \frac{A_0}{\alpha} C_1; \quad C_3 = T_0 - \frac{\ln a}{b} \cdot C_2. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Распределение температуры в океанической части литосферы рассчитывалось в зависимости от её возраста в рамках модели остывающего полупространства [5, 15] в соответствии с соотношением:

$$\frac{T(z) - T_0}{T_H - T_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{z - z_0}{2\sqrt{\chi \cdot t}} \right), \quad (5)$$

где T_H – температура на границе литосфера – литосферная мантия (принималась равной 1717,15 К), χ – коэффициент температуропроводности (принимался равным 10^{-6} м²/с [15], erf – функция ошибок, t – возраст литосферы.

Расчётные соотношения (2) и (5) позволяют количественно оценить термическое состояние геологической среды на различных глубинных уровнях литосферы и построить для этих глубин пространственные распределения температуры для любого региона исследований.

Для постановки задачи термоупругости в перемещениях применялась следующая система уравнений [16]:

$$\left\{ \begin{aligned} \mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{u} + \vec{F} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0) - \rho \ddot{\vec{u}} &= 0, \\ \nabla^2 T + \frac{w_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} \dot{T} - \frac{(3\lambda + 2\mu) \alpha_T T_0}{\lambda_q} \operatorname{div} \dot{\vec{u}} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где u – смещения в геологической среде; F – объёмные силы; λ , μ – коэффициенты Ламе; w_0 – плотность теплового потока; λ_q – коэффициент теплопроводности; T – температура геологической среды; T_0 – температура геологической среды в недеформированном состоянии; α_T – средний коэффициент линейного теплового расширения в интервале температур (T_0, T) ;

$a = \frac{\lambda_q}{c_\varepsilon}$ – коэффициент температуропроводности; ρ – плотность геологической среды.

Первое уравнение системы (6) при определённых начальных и граничных условиях описывает изменение в пространстве и времени поля деформаций, второе уравнение – изменение температурного поля.

Используя формулы (6), на основании соотношений обратной формы закона Гука построим аналитические выражения для количественных оценок всех компонент тензора геодинамических напряжений.

При этом граничные условия задавались следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_z(x, y, h) + \rho(x, y, 0) \cdot g \cdot u_z(x, y, h) &= 0, \\ \tau_{xz}(x, y, h) &= 0, \\ \sigma_z(x, y, 0) &= \rho_{\text{ф}}(x, y) \cdot \Delta g(x, y) \cdot H(x, y), \\ \tau_{xz}(x, y, 0) &= 0, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

где σ_z – вертикальные нормальные напряжения; τ_{xz} – сдвиговые напряжения в вертикальной плоскости XZ (граничные условия для вертикальной плоскости YZ аналогичны плоскости XZ); u_z – вертикальная компонента вектора смещений в геологической среде; ρ – плотность геологической среды на верхней поверхности модели геологической среды (дневная поверхность Земли) в точке с координатами $(x, y, 0)$; g – ускорение свободного падения, принимаемое за постоянную величину как в латеральном отношении, так и по всей глубине рассматриваемого упругого объёма геологической среды; $\rho_{cp}(x, y)$ – средняя плотность геологической среды, вычисляемая как осреднённое значение плотности по её объёму этой среды; $\Delta g(x, y)$ – величина аномалии гравитационного поля в изостатической редукции в точке с координатами (x, y) ; $H(x, y)$ (в м) – толщина (глубина) слоя геологической среды в точке с координатами (x, y) ; точки с координатами $(x, y, 0)$ соответствуют нижней границе объёма геологической среды (границе Мохоровичича – границе Мохо); точки с координатами (x, y, h) соответствуют верхней границе геологической среды (дневной поверхности Земли); h – параметр, соответствующий верхней поверхности модели.

Первое условие системы (7) – это условие компенсации силовых (возмущающих) воздействий на дневной поверхности Земли. Кроме того, на дневной поверхности Земли вертикальные сдвиговые напряжения должны быть равны нулю, поскольку на границе раздела земная кора – атмосфера никаких вертикальных сдвиговых напряжений не существует. Об этом свидетельствует второе уравнение граничных условий (7) [14].

Третье уравнение системы (7) – условие влияния возмущений от распределённой «нагрузки» на нижней границе модели (границе Мохо). Эта «нагрузка» уравнивается вертикальными нормальными геодинамическими напряжениями на границе раздела земная кора – литосферная мантия (на границе Мохо).

Что касается нижней поверхности модельного пространства, то вертикальные же сдвиговые напряжения, как и у верхней поверхности, будут отсутствовать, поскольку ниже границы Мохо среда уже не упругая, а вязкая. Это отвечает четвёртому условию из соотношений системы (8).

В итоге найденные нами решения позволили количественно оценить напряжения и смещения, формирующиеся в упругой геологической среде вследствие влияния на неё возмущений, связанных с комплексным воздействием на эту среду тектонических и термических процессов [13].

Экспериментальные исследования

Результаты, полученные в ходе реализации математических моделей, ориентированы на решение задачи оценки термоупругих деформаций в поверхностных слоях земной коры южной Якутии.

Для этого построено пространственное распределение температуры геологической среды по всему объёму исследуемого пространства литосферы южной части Якутии. Пространственное распределение температуры для континентальной части литосферы рассчитывалось на основании выражения (2) с учётом соотношений (3) и (4). Кроме того, для подобных оценок использовалась информация о распределении величин поверхностной температуры, температуры на границе литосфера – литосферная мантия, поверхностного теплового потока и поверхностного коэффициента теплопроводности. За величину температуры на границе литосфера – литосферная мантия для континентальной части литосферы принято её значение в 1573,15 К.

На рисунке 1 для примера представлено распределение температуры геологической среды южной части Якутии для глубины 40 км.

Количественные оценки напряжений и смещений в геологической среде проводились в два этапа. Вначале найдены значения напряжений и смещений с учётом только тектонической составляющей воздействий на упругий объём геологической среды, затем по тем же соотношениям рассчитывались значения указанных величин с учётом и термических воздействий на эту среду.

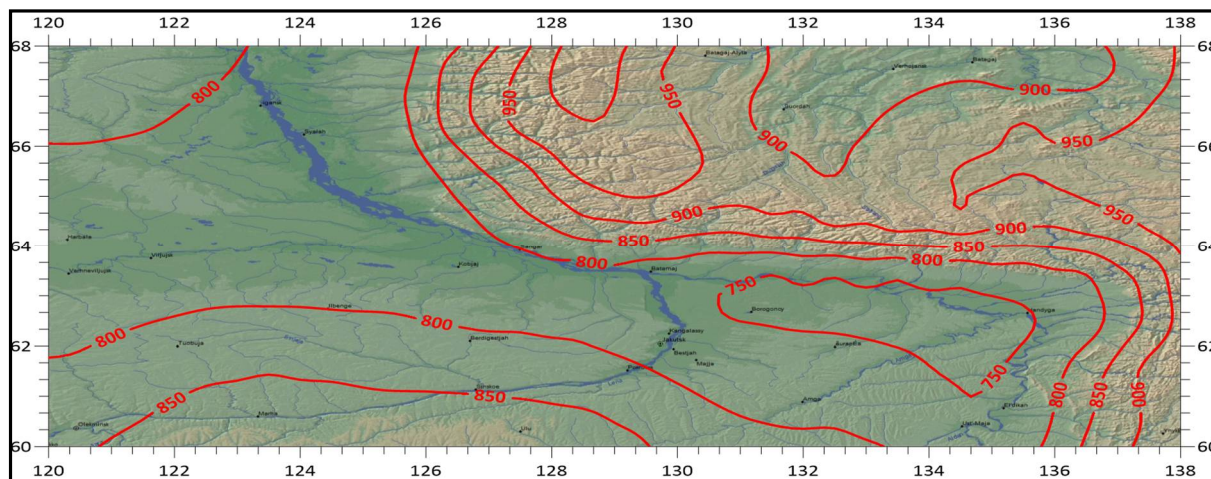


Рисунок 1 – Распределение температуры в геологической среде на глубине 40 км для территории южной части Якутии (в град. К)

Figure 1 – Temperature allocation in geological environment on the depth of 40 km for the territory of southern part of Yakutia (in degrees K)

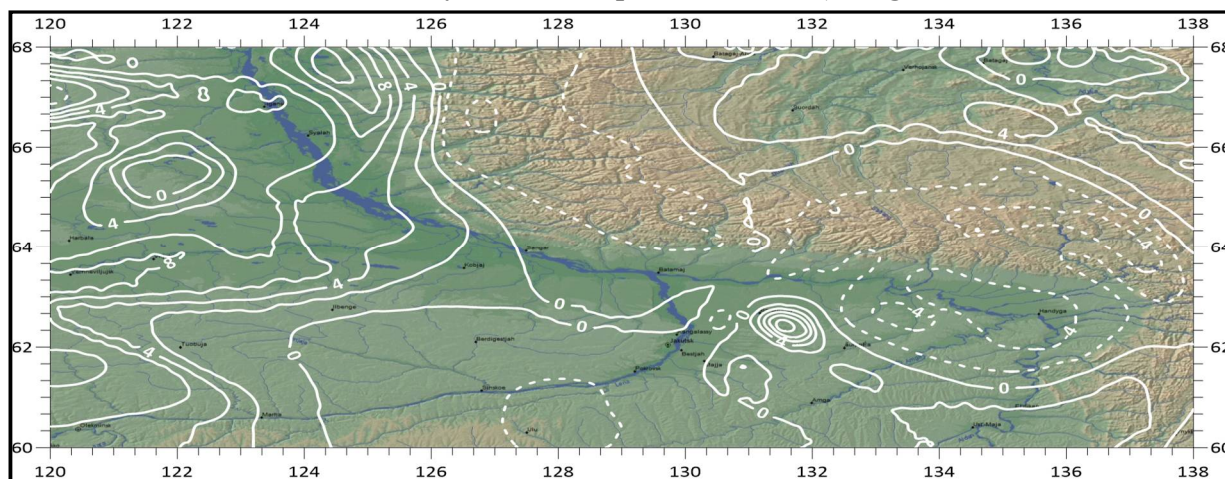


Рисунок 2 – Распределение скоростей вертикальных тектонических движений (в мм/год) на территории южной части Якутии

Figure 2 – Allocation of vertical tectonic movements speeds (in mm/year) on the territory of southern part of Yakutia

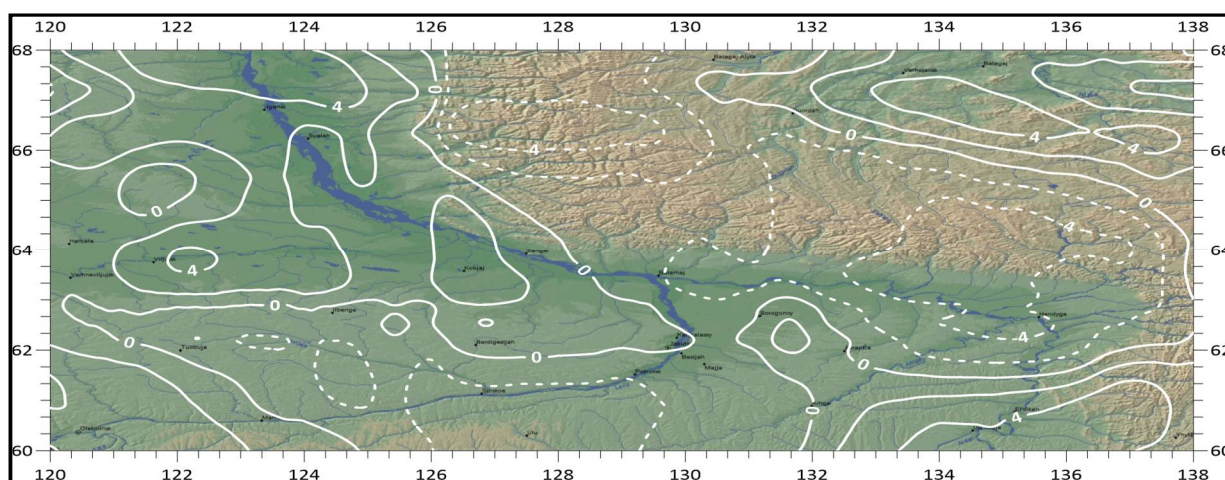


Рисунок 3 – Распределение скоростей вертикальных смещений (в мм/год) на поверхности для территории южной части Якутии с учётом тектонических и термических воздействий

Figure 3 – Allocation of vertical displacement speeds (in mm/year) on the surface of southern part of Yakutia territory, calculated taking into account tectonic and thermal influences

Далее сопоставлены распределения скоростей вертикальных тектонических движений, которые известны для южной части Якутии (рисунок 2), с распределениями скоростей вертикальных смещений на поверхности, полученных в результате модельных расчётов как с учётом термических воздействий (рисунок 3), так и без них (рисунок 4).

Помимо визуальных оценок, сделаны сравнительные численные оценки напряжений и смещений в поверхностных слоях земной коры южной части Якутии. Они показали, что необходимо учитывать как тектонические, так и термические воздействия на геологическую среду.

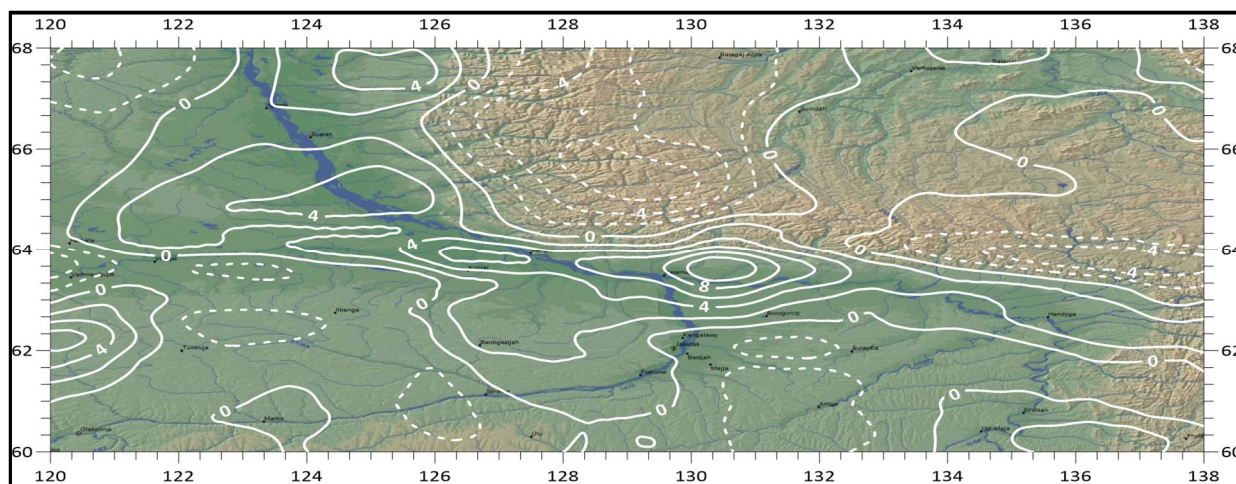


Рисунок 4 – Распределение скоростей вертикальных смещений (в мм/год) на поверхности для территории южной части Якутии, рассчитанных с учётом тектонических воздействий
Figure 4 – Allocation of vertical displacement speeds (in mm/year) on the surface of southern part of Yakutia territory, calculated taking into account tectonic influences

Рассмотрим результаты оценок термоупругих деформаций. Количественные расчёты выполнены для территории, прилегающей к г. Якутску – столице Республики Саха. Представим для этого региона подробные карты-схемы распределений скоростей вертикальных (рисунок 5) и горизонтальных (рисунок 6) смещений на поверхности.

На основании данных, приведенных на рисунке 5, для территории, прилегающей к Якутску, наблюдаются высокие скорости современных горизонтальных смещений [17]. Действительно, на пересечении $62,5^\circ$ с. ш. и 131° в. д. скорости горизонтальных смещений на поверхности (рисунок 6) равны 20 – 25 мм/год

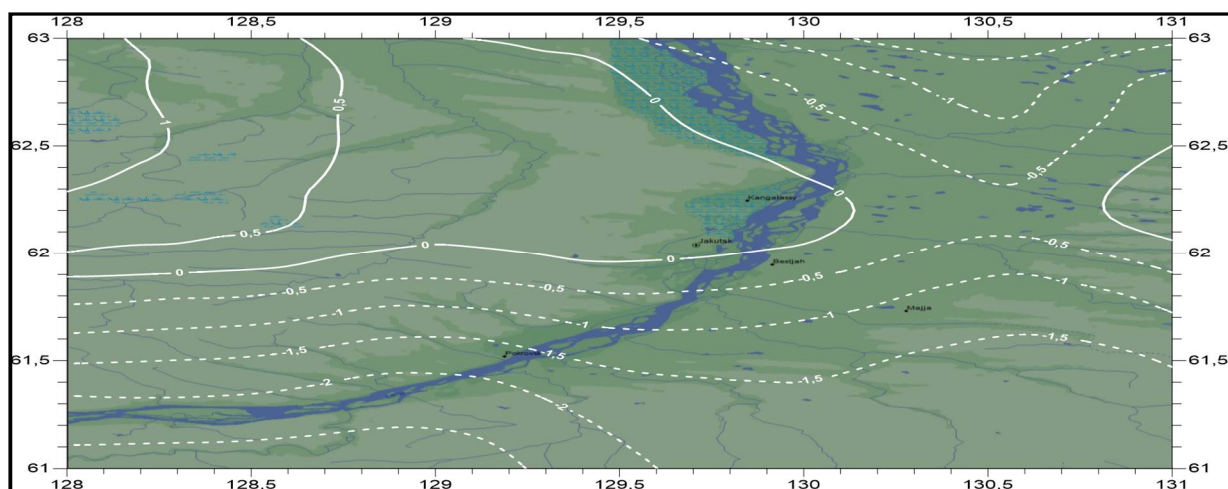


Рисунок 5 – Распределение скоростей вертикальных смещений (в мм/год) для окрестностей Якутска
Figure 5 – Allocation of vertical displacement speeds (in mm/year) for the vicinity of Yakutsk

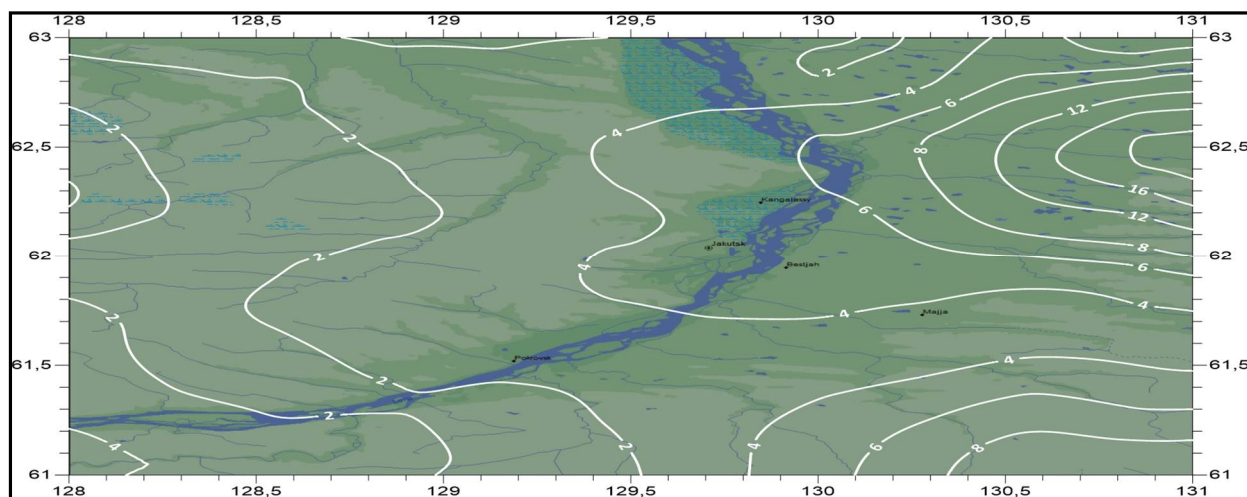


Рисунок 6 – Распределение скоростей горизонтальных смещений (в мм/год) для окрестностей Якутска

Figure 6 – Allocation of horizontal displacement speeds (in mm/year) for the vicinity of Yakutsk

Рассмотрим термоупругие деформации. Они также количественно оценены, что дало возможность построить соответствующие карты-схемы их распределений (рисунки 7, 8).

При анализе рисунков 7, 8 обращает на себя внимание то, что горизонтальные деформации на порядок превышают вертикальные. Всё это свидетельствует о том, что зафиксированные по инструментальным данным повторного нивелирования скорости современных вертикальных движений не всегда отражают реальный темп и направленность движений земной коры. Поэтому не всегда в исследованиях нужно ориентироваться на полную сопоставимость с инструментальными данными. Всякий раз необходима дополнительная информация о проверке соответствия теоретических и эмпирических данных.

В этой связи необходимо отметить тот факт, что в наших исследованиях коэффициент корреляции между указанными данными существенно увеличился (с +0.2 до +0.8) только за счёт того, что в модели стали учитывать не только аномалии гравитационного поля, но и термические воздействия. Это объясняется тем, что тепловой поток не только является основным источником информации о тепловом состоянии Земли и внутренней энергетике происходящих в ней процессов, но и позволяет переоценить упругие деформации, формирующиеся в земной коре из-за протекания тепловых и иных процессов, последствия которых фиксируются на дневной поверхности сетями повторного нивелирования и подтверждаются результатами проведения глубинного сейсмического зондирования Земли [4].

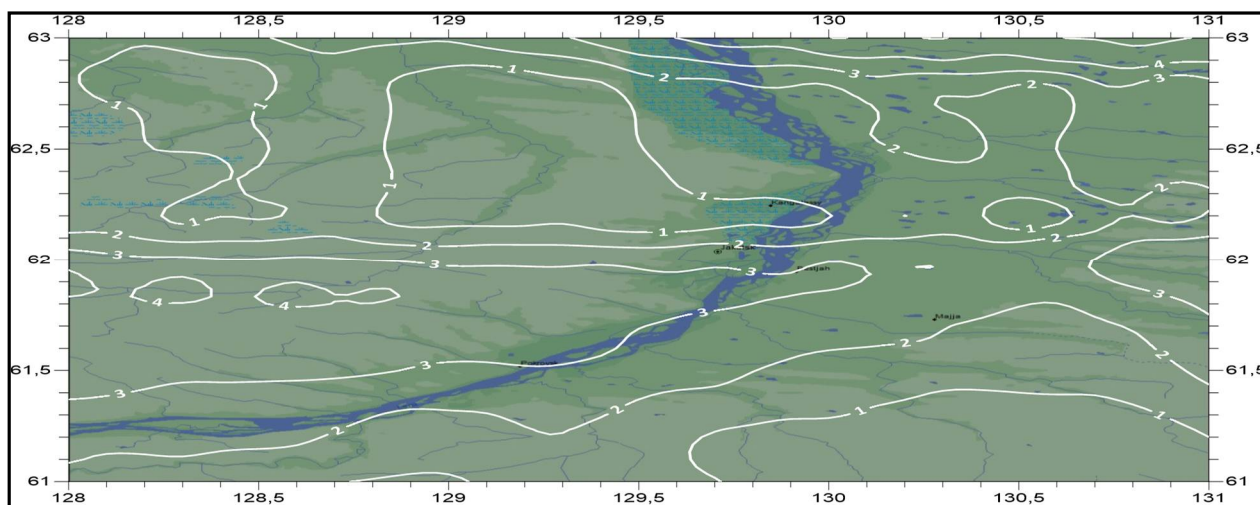


Рисунок 7 – Распределение вертикальных деформаций ($\times 10^{-7}$) для окрестностей Якутска

Figure 7 – Allocation of vertical deformations ($\times 10^{-7}$) for the vicinity of Yakutsk

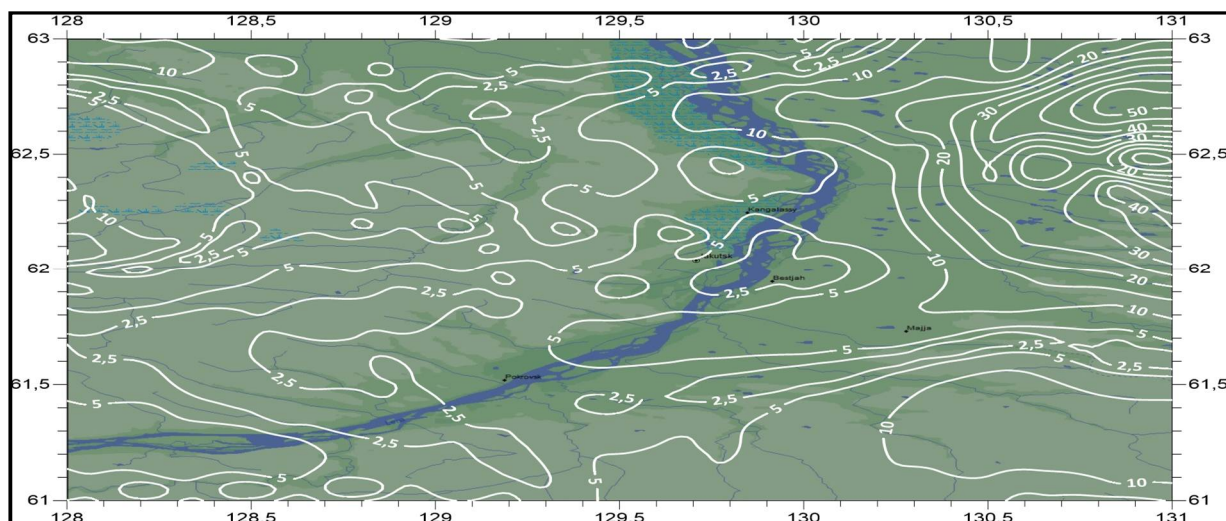


Рисунок 8 – Распределение горизонтальных деформаций ($\times 10^{-7}$) для окрестностей Якутска
Figure 8 – Allocation of horizontal deformations ($\times 10^{-7}$) for the vicinity of Yakutsk

Заключение

Как показали исследования, сложность количественной оценки напряжений, смещений и деформаций в земной коре заключается в том, что при проведении подобных работ возникает ряд существенных противоречий.

Первое из них связано с входной информацией, используемой в моделях возмущённого состояния геологической среды: каковы ее геофизические параметры, и каким образом их включать в уравнения.

Второе логически вытекает из первого: какова структура математической модели, сколько в ней уравнений, что эти уравнения отражают физически, каким реальным процессам они соответствуют.

Третье – это сама количественная оценка величин напряжений, смещений и деформаций. Ведь до сих пор нет единого мнения, какими должны быть реальные значения этих величин, диапазон их изменения весьма широк. Конечно, для каждого типа геологической структуры проводились экспериментальные измерения напряжений, смещений и деформаций. В этом смысле при моделировании напряжённо-деформированного состояния геологической среды есть, на что ориентироваться. Но проблема заключается в том, что экспериментальные оценки выполнены для приповерхностных слоёв земной коры, а что там, на большой глубине, только предполагается.

Вот именно поэтому при оценках ориентируются на те геофизические параметры, которые «лежат» на поверхности, в прямом смысле этого слова. В частности, на наблюдаемые данные о величинах скоростей современных вертикальных тектонических движений, полученных методом повторного нивелирования. К сожалению, информация распределённого характера по скоростям современных горизонтальных движений на сегодняшний день отсутствует. Между тем горизонтальная динамика геологической среды очень значительна и существенно доминирует над вертикальной.

Учёт термических процессов, протекающих в геологической среде на различных глубинах, даёт возможность приблизиться к реальным значениям ключевых геофизических параметров, в нашем случае – к значениям скоростей вертикальных современных тектонических движений, и их пространственному региональному распределению.

Поскольку значения скоростей вертикальных смещений определяются на основании оценок напряжений и смещений, можно адекватно оценить величины деформаций, что и было выполнено в ходе исследовательских работ. Численные оценки термоупругих деформаций в поверхностных слоях южной части Якутии по своему порядку ($10^{-7} - 10^{-6}$) находятся в

хорошем соответствии с экспериментальными оценками, выполненными исследователями для аналогичных геологических структур [4, 18].

Подытоживая полученные результаты, отметим, что в ходе их получения произведено обоснование выбора региона исследований, разработаны математические модели количественной оценки температуры литосферы для различных глубинных горизонтов, а также оценки напряжений, смещений и деформаций в земной коре с учётом совокупных тектонических и термических возмущающих воздействий на геологическую среду.

На основании этих моделей построены поля распределений температуры для нижней границы модельного пространства, а также скоростей вертикальных и горизонтальных смещений на дневной поверхности, выполнены численные оценки смещений и термоупругих деформаций в поверхностных слоях земной коры как для всей южной Якутии, так и для окрестностей Якутска.

Показана достаточно значимая корреляция (+0.8) расчётных и реальных данных по скоростям вертикальных современных тектонических движений на дневной поверхности, а также численные соответствия модельных и эмпирических данных по скоростям современных вертикальных и горизонтальных движений.

Отмечено, что горизонтальные термоупругие деформации доминируют над вертикальными, формируя значительные геодинамические риски для Якутска и его окрестностей, чего нельзя не учитывать при развитии инфраструктуры городской среды и строительстве различных транспортных коммуникаций и объектов, в том числе – мостовых сооружений через реку Лена.

Важно подчеркнуть, что разработанные математические модели дают возможность описывать распределения температуры геологической среды для любого глубинного горизонта земной коры, в том числе – для её поверхностных слоёв. В настоящее время оценки значений температуры выполняются для диапазона глубин 0 – 80 км с шагом по глубине в 1 км. Такая значительная дискретность объясняется шагом имеющихся термических данных, используемых в моделях.

Тем не менее, предложенные модели могут использоваться на территориях с линейными размерами в нескольких сотен метров, в том числе – и для условий криолитозоны. При наличии для исследуемой территории информации о поверхностном тепловом потоке и реологии геологической среды возможно построение полей распределения термоупругих деформаций и температуры указанной среды для диапазона глубин 0 – 500 м с шагом по глубине не более 10 м.

Таким образом, при наличии достоверной входной информации на сегодняшний день реально решаемые задачи – это количественные оценки температуры, термоупругих деформаций, их пространственного распределения в пределах первой сотни метров поверхностного слоя земной коры, включающего существенные изменения в криолитозоне.

Решения указанных задач дают возможность превентивно оценивать геодинамические риски, «проигрывая» различные природно-техногенные ситуации на исследуемой территории [11]. Предлагаемый подход даёт возможность на принципиально новой основе осуществлять мониторинг зданий, инженерных сооружений и их грунтовых оснований, в том числе – в условиях криолитозоны, разрабатывать обоснованные рекомендации по условиям безопасного строительства как отдельных объектов, так и их комплексов, а также управлять самой процедурой строительства на различных по своему масштабу территориях Республики Саха (Якутии).

В заключение подчеркнем, что обеспечение безопасного и устойчивого развития территорий Республики связано с намечающимися опасностями, тающимися как в верхних слоях земной коры, так и в её глубинах, а также с тем, что все эти опасности могут быть заблаговременно выявлены благодаря технологиям математического моделирования геодинамических рисков.

Библиографический список

1. Глико А. О., Парфенюк О. И. Тепловой режим литосферы и мантии Земли – геотермические исследования ИФЗ РАН // Физика Земли. 2019. № 1. С. 28-41.
2. Дучков А. Д., Железняк М. Н., Аюнов Д. Е. и др. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока (2009 – 2015). URL: <http://maps.nrcgit.ru/geoterm/map/ru>. (Доступ 14.02.2023).
3. Жарков В. Н., Трубицын В. П. Физика планетных недр. М.: Наука, 1980. 448 с.
4. Кузьмин Ю. О., Жуков В. С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Горная книга, 2012. 264 с.
5. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. В 2-х томах. М.: Мир. 1985. 730 с.
6. Stasey F. D., Loper D. E. Thermal History of the Core and Mantle // Phys. Earth Planet. Inter. 1984, pp. 99-115.
7. Трубицын В. П. Проблемы глобальной геодинамики // Физика Земли. 2019. №1. С. 180-198.
8. Артюшков Е. В., Чехович П. А. Новейшие поднятия на древних кратонах: возможные механизмы и связь с сейсмичностью // Геофизические исследования. 2017. Т. 18. № 4. С. 5-16.
9. Harnisch G. Research of Possible Correlation Between the Recent Vertical Crustal Movements and Heat Flow. Gerlands Beitr. Geophysik. 1975. 84, pp. 311-316.
10. Morgan W.J. Heat Flow and Vertical Crustal Movements. Petroleum and Global Tectonics. Princeton University Press. 1975. URL: Heat Flow and Vertical Movements of the Crust (degruyter.com). (Доступ 14.02.2023).
11. Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О. Арктические риски: моделирование, комплексная оценка, управление. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. 420 с.
12. Корячко В. П., Минаев В. А., Степанов Р. О., Фаддеев А. О. Моделирование ветрового переноса опасных веществ при оценках техногенного риска в Арктической зоне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 112-117.
13. Минаев В. А., Фаддеев А. О., Кузьменко Н. А. 3-D моделирование миграции опасных эндогенных геологических процессов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 58. С. 64-74.
14. Фаддеев А. О., Павлова С. А., Невдах Т. М. Построение глобальной математической модели при оценках напряжённо-деформированного состояния литосферы Земли // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 68. С. 61-67.
15. Морган, Джейсон Фиппс; Смит, Уолтер Х. Ф. Сглаживание кривой глубина морского дна – возраст как реакция на астеносферный поток. Природа. 1992. 359 (6395). С. 524-527.
16. Лебедев Н.Н. Температурные напряжения в теории упругости. – Л.; М.: Главная редакция технико-теоретической литературы, 1937. – 110 с.
17. Парфенов Л. М., Кузьмин М. И. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука / Интерпериодика», 2001. 571 с.
18. Замесов Н. Ф., Дзема И. И. Прогнозирование исходных полей напряжений в рудных месторождениях. М.: Изд-во ИПКОН АН СССР, 1987. 157 с. 1. (2).
19. Глико А. О., Парфенюк О. И. Тепловой режим литосферы и мантии Земли – геотермические исследования ИФЗ РАН // Физика Земли. 2019. № 1. С. 28-41.

UDC 539.37; 551.24

MODELING OF THERMOELASTIC DEFORMATIONS AS A SOURCE OF GEODYNAMIC HAZARDS IN THE ARCTIC ZONE

V. P. Koryachko, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Head of the Department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0272-673X, e-mail: koryachko.v.p@rsreu.ru

V. A. Minaev, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Moscow University of Internal Affairs Ministry of Russia, Moscow, Russia;

orcid.org/0000-0002-5342-0864, e-mail: mlva@yandex.ru

R. O. Stepanov, Ph.D. (Tech.), associate professor, Director of the Directorate for Arctic Programs, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

orcid.org/0000-0001-9124-5924, e-mail: stepanovr@bmstu.ru

A. O. Faddeev, Dr. Sc. (Tech.), associate professor, Moscow University of Internal Affairs Ministry of Russia, Moscow, Russia;

orcid.org/0000-0002-7259-1693, e-mail: fao1@mail.ru

*The article deals with the problem of assessing temperature regime at various depths of Earth's crust, the measurement of which by direct methods is impossible, and known indirect methods are difficult to be implemented. **The aim of the work** is to construct a mathematical model of lithosphere temperature regime, the solutions of which made it possible to quantify stresses and displacements formed in geological environment due to a complex impact of tectonic and thermal processes on it. The results of quantitative estimates of thermoelastic deformations in surface layers of Earth's crust in relation to Arctic cryolithozone of Russian Federation are presented. Based on simulation results, temperature distribution fields are constructed, numerical estimates of displacements and thermoelastic deformations in surface layers of Earth's crust are performed both for the whole of southern Yakutia and for the vicinity of Yakutsk. An important conclusion is made that the presented models make it possible, on a fundamentally new technological basis, to monitor buildings, engineering structures and their ground bases including cryolithozone conditions, to develop sound recommendations on the conditions of safe construction of both individual objects and their complexes, as well as to control a construction procedure on the territories of different size.*

Key words: Arctic, cryolithozone, modeling, geological environment, temperature regime, thermoelastic deformations, monitoring.

DOI:10.21667/1995-4565-2023-83-72-83

References

1. **Gliko A. O., Parfenyuk O. I.** Teplovoj rezhim litosfery i mantii Zemli – geotermicheskie issledovaniya IFZ RAN. *Fizika Zemli*. 2019, no. 1, pp. 28-41. (in Russian).
2. **Duchkov A. D., Zheleznyak M. N., Ahunov D. E. et al.** *Geotermicheskij atlas Sibiri i Dal'nego Vostoka (2009 – 2015)*. URL: <http://maps.nrcgit.ru/geoterm/map/ru>. (Accessed 02/14/2023). (in Russian).
3. **Zharkov V. N., Trubitsyn V. P.** *Fizika planetnyh neдр* (Physics of planetary bowels). Moscow: Nauka, 1980. 448 p. (in Russian).
4. **Kuzmin Yu. O., Zhukov V. S.** *Sovremennaya geodinamika i variacii fizicheskikh svoystv gornyh porod* (Modern geodynamics and variations of physical properties of rocks). Moscow: Gornaya kniga, 2012. 264 p. (in Russian).
5. **Terkot D., Schubert J.** *Geodinamika* (Geodynamics). In 2 volumes. Moscow: Mir. 1985 730 p. (in Russian).
6. **Stasey F. D., Loper D. E.** Thermal History of the Core and Mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.* 1984, pp. 99-115.
7. **Trubitsyn V. P.** Problemy global'noj geodinamiki. *Fizika Zemli*. 2019, no. 1, pp. 180-198. (in Russian).
8. **Artyushkov E. V., Chekhov P. A.** Novejshie podnyatiya na drevnih kratonah: vozmozhnye mekhanizmy i svyaz' s sejsmichnost'yu. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2017, vol. 18, no. 4, pp. 5-16. (in Russian).
9. **Harnisch G.** Research of Possible Correlation Between the Recent Vertical Crustal Movements and Heat Flow. *Gerlands Beitr. Geophysik*. 1975. 84, pp. 311-316.

10. **Morgan W. J.** *Heat Flow and Vertical Crustal Movements. Petroleum and Global Tectonics.* Princeton University Press. 1975. URL: Heat Flow and Vertical Movements of the Crust (degruyter.com). (Accessed 02/14/2023).
11. **Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** *Arkticheskie riski: modelirovanie, kom-pleksnaya ocenka, upravlenie* (Arctic risks: modeling, integrated assessment, management). Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2022. 420 p. (in Russian).
12. **Koryachko V. P., Minaev V. A., Stepanov R. O., Faddeev A. O.** Modelirovanie vetrovogo perenosa opasnykh veshchestv pri ocenках tekhnogennoho riska v Arkticheskoy zone. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2022, no. 82, pp. 112-117. (in Russian).
13. **Minaev V. A., Faddeev A. O., Kuzmenko N. A.** 3-D modelirovanie migratsii opasnykh endogennykh geologicheskikh processov. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2016, no.58, pp. 64-74. (in Russian).
14. **Faddeev A. O., Pavlova S. A., Nevдах T. M.** Postroenie global'noj matematicheskoy modeli pri ocenках napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya litosfery Zemli. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta.* 2019, no. 68, pp. 61-67. (in Russian).
15. **Morgan, Jason Phipps; Smith, Walter H. F.** Sglazhivanie krivoj glubina morskogo dna – vozrast kak reaktsiya na astenosfernyy potok. *Priroda.* 1992. 359 (6395), pp. 524-527. (in Russian).
16. **Lebedev N. N.** *Temperaturnye napryazheniya v teorii uprugosti* (Temperamental representations in Theory of elasticity). Leningrad, Moscow: Main editorial office of technical and theoretical writers, 1937. 110 p. (in Russian).
17. **Parfenov L. M., Kuzmin M. I.** Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Saha (Yakutiya) (Tectonics, geodynamics and metallogeny territorial Republic of Sakha (Yakutia)). Moscow: MAIK «Science / Interperiodics», 2001. 571 p. (in Russian).
18. **Zamesov N. F., Dzema I. I.** *Prognozirovanie iskhodnykh polej napryazhenij v rudnykh mestorozhdeniyah* (Maintenance of initial fields in ore placements). Moscow: Publishing house of IPCON of the USSR Academy of Sciences. 1987, 157 p. 1. (2)
19. **Glico A. O., Parfenyuk O. I.** Teplovoj rezhim litosfery i mantii Zemli – geotermicheskie issledovaniya IFZ RAN. *Fizika Zemli.* 2019, no. 1, pp. 28-41. (in Russian).