

Геоинформатика. 2024. № 4. С. 70–82.

Geoinformatika. 2024;(4):70–82.

Методико-технологическое обеспечение сбора и обработки данных

Научная статья

УДК 551.4.08, 550.83.016, 550.343.4

<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-70-82>

Выделение линеаментов в Лаптевоморском регионе геоморфометрическими методами: приложение к оценке сейсмической опасности

© 2024 г. — Н.В. Либина^{1, а)}, А.А. Крылов^{1, 2, б)}, Д.Д. Рукавишникова^{1, в)}, С.А. Ковачев^{1, д)}, Б.В. Баранов^{1, е)}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; Москва, Россия

²Научно-технологический университет «Сириус»; Сириус, Россия

^{а)}Inatvit@mail.ru, ^{б)}artyomkrlv@ocean.ru, ^{в)}drukavishnikova@gmail.com, ^{д)}kovachev@ocean.ru, ^{е)}bbaranov@ocean.ru

Аннотация: В настоящей статье приведены аспекты применения геоморфометрических методов к выделению линеаментов регионального масштаба с использованием цифровой модели рельефа и модели поля силы тяжести в морских акваториях на примере моря Лаптевых. Результаты линеаментного анализа показали их применимость для дальнейшего использования при разработке модели зон возникновения очагов землетрясений и оценки сейсмической опасности. Проведенное исследование показало эффективность методов теневого анализа и выделения килевых форм с помощью расчета кривизны рельефа для выявления крупных сейсмолинеаментов при условии совместного использования результатов геоморфометрического анализа с данными о распределении эпицентров землетрясений. Представленный подход к выделению сейсмолинеаментов может оказаться весьма перспективным для разработки линеаментно-доменно-фокальной модели зон возможных очагов землетрясений обширных шельфовых зон России, для которых нет необходимого объема геолого-геофизических и палеосейсмологических данных.

Ключевые слова: линеаментный анализ; теневого анализ; кривизна рельефа; море Лаптевых; оценка сейсмической опасности; модель зон возникновения очагов землетрясений; сейсмолинеаменты.

Для цитирования: Либина Н.В., Крылов А.А., Рукавишникова Д.Д., Ковачев С.А., Баранов Б.В. Выделение линеаментов в Лаптевоморском регионе геоморфометрическими методами: приложение к оценке сейсмической опасности // Геоинформатика. — 2024. — № 4. — С. 70–82. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-70-82>.

Methods and technologies of data acquisition and processing

Original article

Identification of lineaments in the Laptev Sea region by geomorphometric methods: application to seismic hazard assessment

© 2024 — N.V. Libina^{1, а)}, A.A. Krylov^{1, 2, б)}, D.D. Rukavishnikova^{1, в)}, S.A. Kovachev^{1, д)}, B.V. Baranov^{1, е)}

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; Moscow, Russia

²Sirius University of Science and Technology; Sirius, Russia

^{а)}Inatvit@mail.ru, ^{б)}artyomkrlv@ocean.ru, ^{в)}drukavishnikova@gmail.com, ^{д)}kovachev@ocean.ru, ^{е)}bbaranov@ocean.ru

Abstract: This article examines aspects of the application of geomorphometric methods to the identification of regional-scale lineaments using a digital relief model and a gravity field model in marine areas using the Laptev Sea as an example. The results of lineament analysis showed their applicability for further use in developing a model of earthquake source zones and seismic hazard assessment. The study showed the effectiveness of methods of shadow analysis and identification of keel forms by calculating the curvature of the relief for identifying large seismic lineaments, provided that the results of geomorphometric analysis are used together with data on the distribution of earthquake epicenters. The presented approach to identifying seismic lineaments can be very promising for the development of a lineament-domain-focal model of zones of possible earthquake sources in the vast shelf zones of Russia, for which there is no necessary volume of geological, geophysical and paleoseismological data.

Key words: lineament analysis; shadow analysis; relief curvature; Laptev Sea; seismic hazard assessment; model of earthquake source zones; seismic lineaments.

For citation: Libina N.V., Krylov A.A., Rukavishnikova D.D., Kovachev S.A., Baranov B.V. Identification of lineaments in the Laptev sea region by geomorphometric methods: application to seismic hazard assessment. *Geoinformatika*. 2024;(4):70–82. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-4-70-82>. In Russ.

Введение

Линеаменты представляют собой линейные и дугообразные элементы геолого-геофизической среды, находящие отражение в рельефе и включающие в себя разнообразные объекты: разры-

вы и трещины, зоны повышенной концентрации деформаций, градиентные зоны геофизических полей, элементы структурно-вещественной неоднородности геологической среды [1]. Применение линеаментного анализа при наземных иссле-

дованиях показало, что линеаменты, выраженные на поверхности, в значительной степени отражают нарушения структуры фундамента, даже перекрытого мощным осадочным чехлом. Особенности глубинного строения фундамента проецируются на дневную поверхность через осадочный чехол, контролируя формы рельефа. Сопоставление результатов линеаментного анализа с данными морфоструктурного анализа и геофизических наблюдений указывает на то, что трещины, разломы, блоки и межблоковые зоны могут быть выделены по распределению линеаментов и статистическим характеристикам полей малых линеаментов [2–5]. Крупные линеаменты в большинстве случаев являются поверхностным проявлением активных разломов, в том числе глубинных. Это дает основание для использования линеаментного анализа при выделении тектонических нарушений.

Активное развитие методов дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий привело к широкому применению линеаментного анализа как в научно-исследовательских, так и в прикладных геолого-геофизических исследованиях [6, 7]. Современные геоинформационные системы (ГИС), как правило, включают в себя модули, позволяющие выполнять геоморфометрические расчеты, которые могут быть применены в рамках линеаментного анализа. В наземных исследованиях геоморфометрические методы активно используются для выявления тектонических нарушений, поскольку многие крупные линеаменты в рельефе являются поверхностным проявлением неотектонических разломов различной степени активности [8–10].

Для акваторий геоморфометрический анализ цифровых моделей рельефа (ЦМР) до недавнего времени не имел столь широкого применения ввиду отсутствия или малой надежности ЦМР дна большинства морей. Однако регулярное уточнение генеральной батиметрической карты океанов (General Bathymetric Chart of the Oceans — GEBCO [11]) создает условия для применения методов геоморфометрического анализа для выделения линеаментов регионального масштаба по данным батиметрической модели. Так, в работе [12] представлены результаты выявления неотектонических нарушений шельфа Баренцева моря с применением геофизических (сейсморазведочных) методов и морфометрических характеристик кривизны рельефа. Выделение линеаментов по теневому (отмытому) рельефу позволило выявить серию приразломных вулканических построек и зон крупных разрывных нарушений в транзитной зоне континент–море [13, 14].

Результаты линеаментного анализа могут быть использованы в качестве исходных данных для разработки моделей зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), необходимых для расчетов по районированию сейсмической опасности. В основу

районирования сейсмической опасности в России положена концепция линеаментно-доменно-фокальной (ЛДФ) модели зон ВОЗ. Тремя основными структурными элементами этой модели являются: сейсмолинеаменты (оси сейсмоактивных разломных структур), сейсмодомены (квазиоднородные объемы геологической среды характеризующиеся рассеянной сейсмичностью) и потенциальные очаги землетрясений (фрагменты сейсмолинеаментов с установленной для них повторяемостью характерных землетрясений). При этом сейсмолинеаменты являются основным каркасом ЛДФ-модели [15].

Выделение зон ВОЗ основывается на комплексе сейсмологических, геолого-геофизических и геоморфологических данных. Большую роль играют повторные геодезические измерения, включая GPS-наблюдения, а также определение возраста деформаций методами геохронологии [15]. Для обширных шельфовых акваторий окраинных морей России, особенно арктических, проведение таких комплексных работ затруднено. Это приводит к необходимости поиска методов определения геометрии зон ВОЗ на основе анализа доступных ЦМР и геофизических полей для изучаемых акваторий.

Настоящая статья посвящена аспектам применения геоморфометрических методов, а именно теневого анализа и выделения килевых форм с помощью расчета кривизны рельефа дна, к выделению линеаментов регионального масштаба на ЦМР и модели поля силы тяжести морских акваторий на примере моря Лаптевых. Результаты линеаментного анализа показали их применимость для дальнейшего использования при разработке модели зон ВОЗ и оценки сейсмической опасности. Поэтому важной составляющей статьи является рассмотрение выделенных линеаментов как вероятных сейсмогенерирующих структур (сейсмолинеаментов), что потребовало привлечения данных о распределении и параметрах очагов землетрясений в регионе. Выбор Лаптевоморского региона обусловлен тем, что он является наиболее сейсмоактивным в российском секторе Арктического бассейна и располагается в зоне перехода спредингового хребта Гаккеля на континент [16–18].

Характеристика района исследования

В конце мела и кайнозое Лаптевоморский регион стал ареной развития интенсивного рифтогенеза, связанного с раскрытием Евразийского бассейна. Рифтогенез находит отражение в широком развитии рифтовых структур на шельфе моря Лаптевых, простирающихся на юго-восток от континентального склона, к которому подходит срединно-океанический хребет Гаккеля, отделенный от рифтовой системы моря Лаптевых Хатанга-Ломоносовской зоной разломов [16, 19].

Рельеф Лаптевоморского шельфа контролируется системой прогибов и поднятий фундамента,

которые имеют субмеридиональное — северо-западное простирание. В структурном плане они соответствуют грабенам и горстам, образовавшимся за счет растяжения, связанного с внедрением срединно-океанического хребта Гаккеля в континентальную кору моря Лаптевых. Колебания рельефа поднятий и прогибов фундамента рифтогенной природы достигают первых километров и, несмотря на большую мощность осадочного чехла, достаточно отчетливо проявляются в рельефе. Вдоль основных рифтовых зон протягиваются пологие долины, на шельфе в некоторых местах даже были обнаружены вытянутые вдоль этих структур разломы, которые выходят на поверхность, формируя уступы высотой в несколько метров [20]. Ряд поднятий ограничивают понижения, к которым приурочены подводные долины. Эти подводные долины маркируют русла рек, которые существовали здесь во время последнего ледникового максимума [21]. В то же время структуры сдвиговой природы, такие как Хатанга-Ломоносовская зона разломов, из-за небольших вертикальных смещений выделяются только на отдельных участках [22].

Море Лаптевых и примыкающие береговые районы начиная с начала 70-х гг. XX в. были вклю-

чены в ряд сейсмотектонических схем и моделей [15, 17, 23–25] — их различие обуславливается постепенным накоплением данных об относительно малоизученной разломной тектонике Лаптевоморского региона. Тем не менее проблема поиска оптимальной модели зон ВОЗ для Лаптевоморского региона не решена до сих пор вследствие труднодоступности региона и сложности проведения детальных инженерно-геофизических и инженерно-геологических работ в морских полярных условиях.

Данные и методы

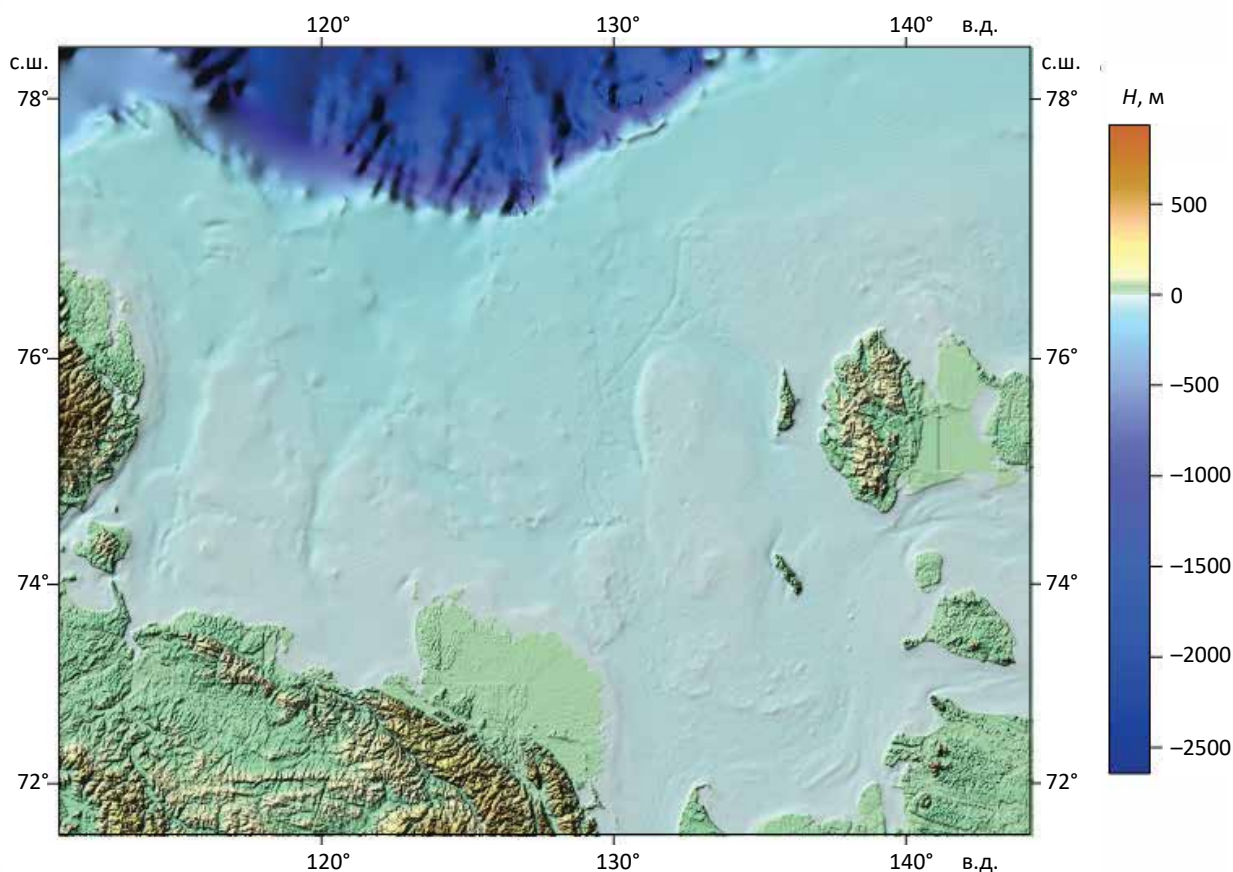
Геоморфометрический анализ

В настоящей статье в качестве исходных данных для геоморфометрического анализа рельефа моря Лаптевых и прилегающей части суши использовался фрагмент ЦМР IBCAO v. 4.2 (рис. 1) [26]. Шаг дискретизации сетки 5 км соответствовал задаче выделения линейных элементов регионального уровня и являлся менее чувствительным к неточностям ЦМР, слабо обеспеченной данными высокого разрешения в шельфовой зоне моря Лаптевых.

Поскольку разломам соответствуют границы изменения параметров геофизических полей, помимо ЦМР для исследуемого района была исполь-

Рис. 1. Визуализация фрагмента ЦМР IBCAO v. 4.2 для моря Лаптевых [26]

Fig. 1. Visualization of a fragment of the IBCAO v. 4.2 DEM for the Laptev Sea [26]



зована модель аномального поля силы тяжести в редукции Буге, так как именно аномалии в редукции Буге обусловлены глубинными неоднородностями в земной коре. В качестве исходных данных выбрана глобальная модель WGM2012 [27].

Для выделения разломов на ЦМР были применены методы геоморфометрического анализа рельефа: теневой анализ и выделение килевых форм с помощью расчета кривизны рельефа дна. Все расчеты и построения линий возможных разломов выполнялись при помощи программного комплекса Surfer Golden Software v.16.

Выделение линеаментов регионального масштаба не требует ЦМР высокой детальности, поэтому предварительно выполнялось сглаживание низкочастотной фильтрацией. Фильтры низких частот (ФНЧ) сглаживают локальные отклонения рельефа и артефакты, связанные с тем, что ЦМР дна сформирована на основе данных из различных источников.

Теневой анализ морфологии дна выполнялся визуальным путем по полутоновым изображениям (теневым картам) ЦМР с его условной подсветкой при разных азимутах виртуального источника света. Вертикальный угол подсветки составлял 45°, азимуты были равны 45, 135, 225, 315°.

Методика проведения теневого анализа хорошо проиллюстрирована в работе [28]. В нашем случае участок дна изучаемого района был рассмотрен при разных положениях условного источника света для того, чтобы все линейные элементы рельефа были отчетливо различимы. На каждой теневой карте последовательно вручную выделялись предполагаемые линеаменты. В итоге все выделенные при разных положениях условного источника света линеаменты сводились на одной карте.

Выделение килевых форм рельефа дна проводилось после расчета профильной (вертикальной) и плановой (горизонтальной) кривизны, геоморфометрических величин, основывающихся на производных второго порядка функции ЦМР и описывающих выгнутые и вогнутые формы рельефа, т. е. гребневые и килевые формы [29]. Профильная (вертикальная) кривизна (КР) — это кривизна поверхности в направлении максимального уклона (кривизна линии профиля, заложенной вдоль направления линии тока), а горизонтальная (плановая) кривизна (КН) — кривизна линии, образованной пересечением земной поверхности с плоскостью, перпендикулярной к направлению ориентации максимального градиента (экспозиции) [30]:

$$K_p = \frac{rxp^2 + 2spq + tq^2}{(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)^{3/2}}, \quad (1)$$

$$K_H = \frac{rq^2 - 2spq + tp^2}{(p^2 + q^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где $p = \frac{\partial Z}{\partial x}$, $q = \frac{\partial Z}{\partial y}$, $r = \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2}$, $s = \frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y}$, $t = \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}$ — частные производные функции $Z(x, y)$, представляющей собой значение высоты в точке с географическими координатами (x, y) .

Лаптевоморский регион включает береговую область со сложно пересеченным рельефом, шельфовую область непосредственно моря Лаптевых и глубоководную часть Северного Ледовитого океана. Более расчлененный рельеф береговой части требует предварительной фильтрации с параметрами, отличными от таковых для фильтрации шельфовой и глубоководной частей. Поэтому расчеты проводились отдельно для акватории и суши. На картах распределения кривизны находились предельные значения отрицательных форм кривизны (килевые формы), по которым проводилось ручное выделение возможных линеаментов.

Для модели аномального поля силы тяжести, как и для ЦМР, были рассчитаны характеристики кривизны. Это позволило выделить градиентные линии изменения параметров поля от минимального к максимальному, по которым и выделялись линии линеаментов, предположительно соответствующие тектоническим нарушениям.

Схема активных разломов для верификации результатов геоморфометрического анализа

Для оценки достоверности результатов геоморфометрического анализа и их применимости для выявления геометрии сейсмолинеаментов использовалась сводная схема активных разломов, составленная по данным из открытых источников. Были рассмотрены как собственно схемы активных разломов, так и сведения о признаках современной тектонической активности, прежде всего тектонические уступы и смещения в верхней части осадочного чехла. В первую очередь использовались тематические публикации, в том числе статьи, карты и схемы, составленные по материалам геофизической съемки, накопленным за последние 20 лет [20, 31, 32–44]. При составлении схемы также привлекались доступные геофизические данные, вошедшие в отчеты по проектам изучения акватории с целью составления Государственных геологических карт (ГГК) 3-го поколения [45–48]. В итоге при подготовке схемы были выбраны наиболее достоверные разломные структуры, прослеженные в областях, где была проведена регулярная геофизическая съемка.

Сейсмологическая изученность и данные

При оценке активности разломов были проанализированы доступные сведения об инструментальных сейсмологических наблюдениях в Лаптевоморском регионе. С середины 80-х гг. XX в. по

настоящее время регистрация событий осуществлялась несколькими стационарными сейсмостанциями Якутского филиала Геофизической службы РАН в районе пос. Тикси. Помимо этого, было проведено несколько локальных инструментальных сейсмологических исследований на суше: экспедиции ПГО «Севморгеология» в 1972–1976 гг. (район Новосибирских островов) [49] и 1985–1988 гг. (дельта р. Лена и побережье губы Буор-Хая) [50]. Отдельно следует упомянуть сейсмологический эксперимент с донными сейсмографами в губе Буор-Хая [51]. В 2018–2020 гг. в серии морских экспедиций сотрудниками Института океанологии РАН проводились наблюдения с помощью донных сейсмостанций [52, 53].

В настоящей работе был подготовлен сводный каталог землетрясений в Лаптевоморском регионе, объединяющий данные крупнейших электронных баз данных ЕГС РАН [54], ISC [55], USGS [56]. Также сводный каталог содержит данные о землетрясениях, зарегистрированных донными сейсмостанциями, которые устанавливались в результате серии морских экспедиций в море Лаптевых [33, 53].

Результаты и обсуждение

В результате анализа теневых карт ЦМР и расчета профильной и плановой кривизны были ориентировочно выделены разломы регионального масштаба, выраженные в рельефе дна. Выделение более мелких структур осложнено тем, что осадоч-

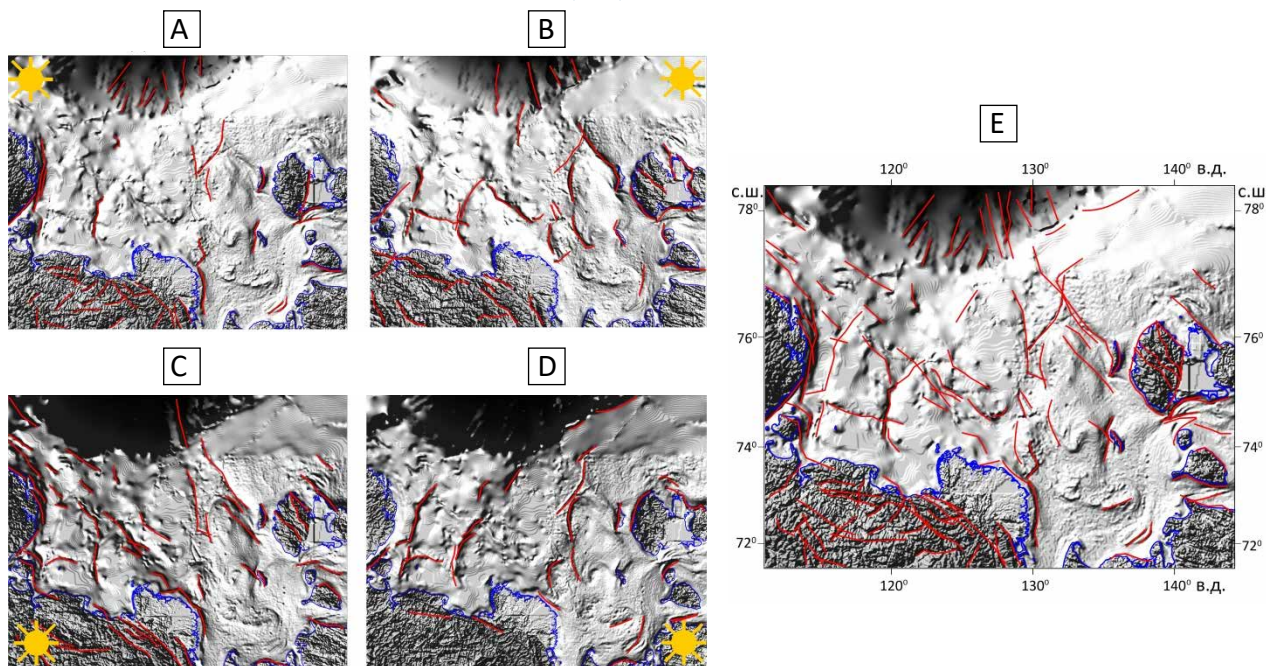
ный чехол сглаживает проявление структуры фундамента на поверхности морского дна.

Результаты выделения линеаментов по полутоновым изображениям (теневым картам) ЦМР представлены на рис. 2. Линейные элементы рельефа становятся отчетливо различимыми при разных азимутах подсветки. Таким образом, вариация азимуты подсветки позволяет получить наиболее полную картину распределения линеаментов, отраженную на сводной карте (см. рис. 2 Е).

Результаты выделения линеаментов по распределению профильной и плановой кривизны рельефа приведены на рис. 3, 4. Видно, что на шельфе наиболее выраженные и протяженные линеаменты выделяются на карте профильной кривизны (см. рис. 3А). Карта плановой кривизны (см. рис. 3В) для шельфовых глубин практически неинформативна. Однако на карте плановой кривизны отчетливо выделяются линеаменты на континентальном склоне, что дает основание использовать плановую кривизну при линеаментном анализе глубоководной части моря. Это отчетливо демонстрируют карты профильной кривизны (см. рис. 4А) и плановой кривизны (см. рис. 4В), где на первой более отчетливо выделяются линеаменты, параллельные бровке шельфа, а на второй — линеаменты, перпендикулярные бровке шельфа. При этом значения K_p и K_n , используемые при анализе глубоководной части, значительно ниже, чем для шельфовых глубин. Таким образом, шельф и глу-

Рис. 2. Результаты выделения линеаментов по полутоновым изображениям (теневым картам) ЦМР при вертикальном угле подсветки 45° и различных азимутах: А — 135° , В — 45° , С — 225° , D — 315° . Е — сводная карта.

Fig. 2. Results of identifying lineaments from grayscale images (shadow maps) of the DEM with a vertical illumination angle of 45° and various azimuths: A — 135° , B — 45° , C — 225° , D — 315° . E — summary map.



Береговая линия показана синим цветом, выделенные линеаменты — красным
The coastline is shown in blue, the highlighted lineaments are shown in red

Рис. 3. Результаты выделения линеаментов (красные линии) на картах профильной (А) и плановой (В) кривизны рельефа для шельфовой зоны и части континентального склона моря Лаптевых

Fig. 3. Results of identifying lineaments (red lines) on maps of profile (A) and plan (B) relief curvature for the shelf zone and part of the continental slope of the Laptev Sea

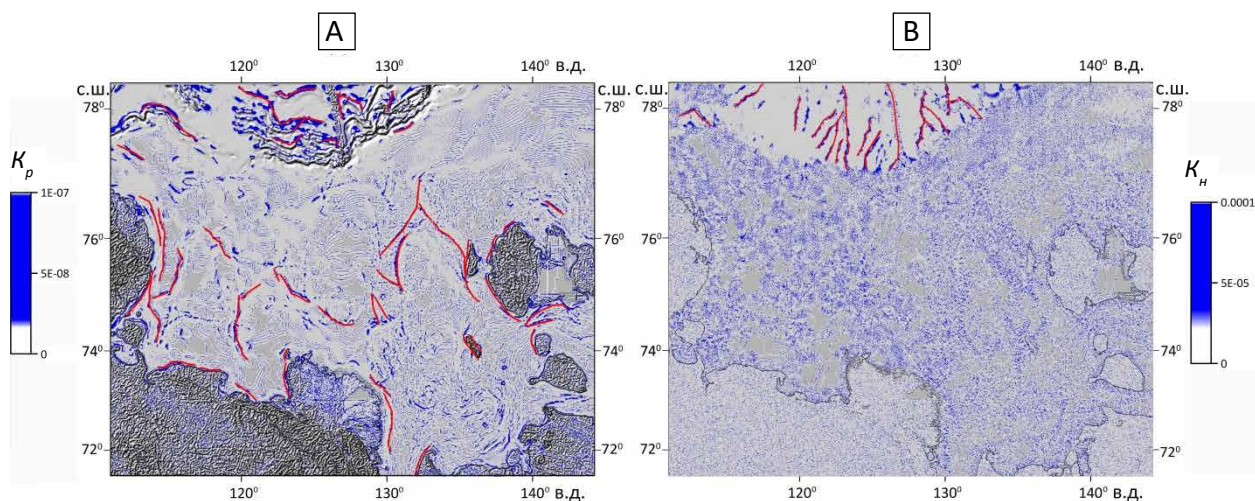
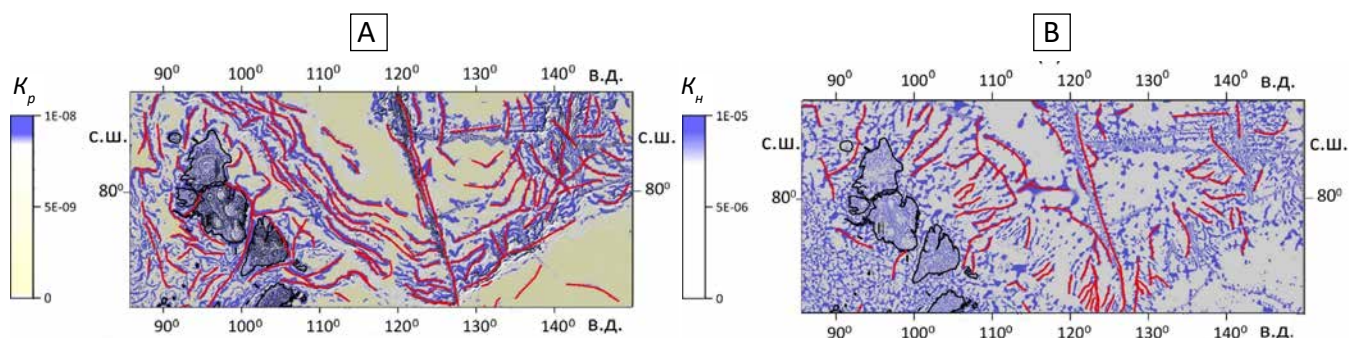


Рис. 4. Карты распределения линеаментов (красные линии), полученных с помощью анализа карт профильной (А) и плановой (В) кривизны рельефа для глубоководной части Лаптевоморского региона

Fig. 4. Maps of distribution of lineaments (red lines) obtained by analyzing maps of profile (A) and plan (B) relief curvature for the deep-sea part of the Laptev Sea region



боководная часть морей должны рассматриваться отдельно, иначе линеаментный анализ по распределению профильной и плановой кривизны рельефа приводит либо к излишней «зашумленности» линий на шельфе, либо к недостаточной контрастности линий в глубоководной части моря.

Результаты выделения линеаментов по распределению профильной и плановой кривизны аномального поля силы тяжести в редукции Буге для Лаптевоморского региона представлены на рис. 5. Линеаменты выделялись по геометрии градиентных линий изменения параметров поля. Поскольку аномалии поля тяжести в редукции Буге обусловлены глубинными неоднородностями в земной коре, выделенные линеаменты предположительно соответствуют глубинным разломам.

Следует подчеркнуть, что ручное выделение линеаментов имеет значительную степень субъективности, так как используется визуальный анализ, при котором принимаются во внимание контраст-

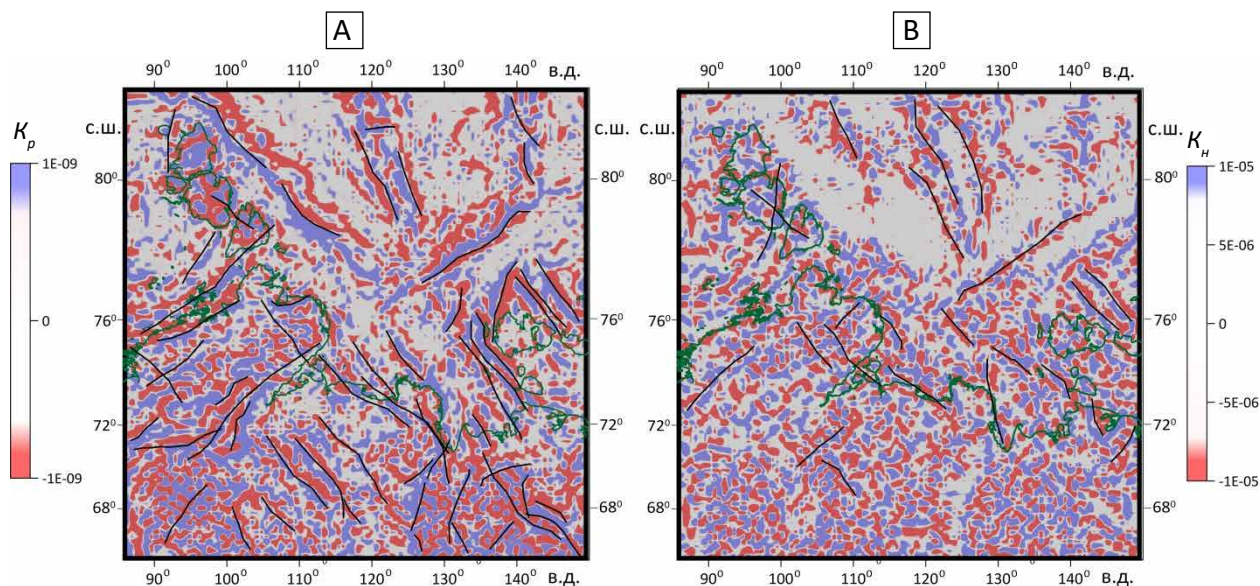
ность линий, их непрерывность и протяженность. Задача автоматизированного выделения линеаментов в настоящей работе не рассматривалась.

На рис. 6 приведена сводная схема, на которую нанесены линеаменты, полученные в результате анализа ЦМР, и модели аномального поля силы тяжести в редукции Буге, а также активные разломные зоны моря Лаптевых, полученные в результате обобщения доступных публикаций, тектонических и геологических карт, упоминаемых выше. Кроме того, на сводную схему нанесены эпицентры землетрясений из подготовленного сводного каталога.

Из рис. 6 видно, что области, где сконцентрированы и эпицентры землетрясений, и линеаменты, выделенные одновременно по ЦМР, и модели поля силы тяжести, в целом соответствуют расположению наиболее достоверных активных разломных зон, показанных по литературным данным. На рис. 6 выделено и пронумеровано семь таких областей. Все они соответствуют определенным

Рис. 5. Результаты выделения линеаментов по распределению профильной (А) и плановой (В) кривизны аномального поля силы тяжести в редукции Буге для Лаптевоморского региона.

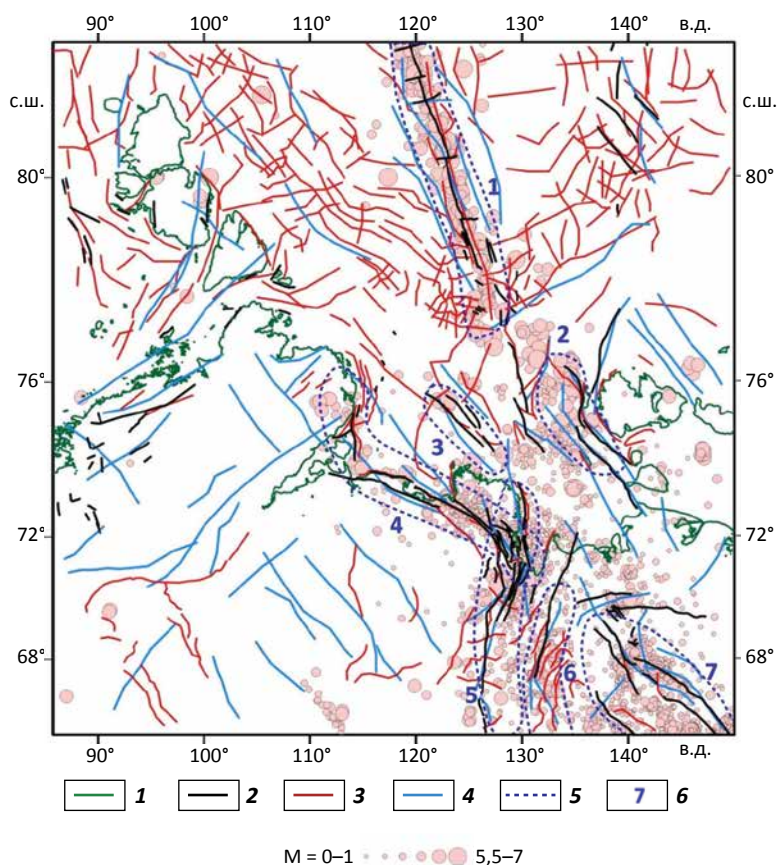
Fig. 5. Results of identifying lineaments from the distribution of profile (A) and plan (B) curvature of the anomalous gravity field in the Bouguer reduction for the Laptev Sea region.



Береговая линия показана зеленой линией, выделенные линеаменты — черными линиями
The coastline is shown as a green line, the highlighted lineaments are shown as black lines

Рис. 6. Сводная схема распределения выделенных в настоящей работе линеаментов, активных разломных зон и эпицентров землетрясений

Fig. 6. Summary scheme of the distribution of lineaments, active fault zones and earthquake epicenters identified in this work



1 — береговая линия; **2** — активные разломные зоны, показанные по литературным данным; **3** — линеаменты, выделенные с помощью анализа кривизны рельефа и теневого рельефа; **4** — линеаменты, выделенные по кривизне аномального поля силы тяжести в редукции Буге; **5, 6** — области вероятных сейсмолинеаментов и их порядковые номера. Залитые розовые кружки соответствуют эпицентрам землетрясений из подготовленного сводного каталога (диаметр пропорционален магнитуде землетрясений M)

1 — coastline; **2** — active fault zones, shown according to literature data; **3** — lineaments identified using the analysis of relief curvature and shadow relief; **4** — lineaments identified by the curvature of the anomalous gravity field in the Bouguer reduction; **5, 6** — areas of probable seismic lines and their serial numbers. The filled pink circles correspond to the epicenters of earthquakes from the prepared joint catalog (the diameter is proportional to the earthquake magnitude M)

крупным тектоническим структурам: 1 — хребту Гаккеля; 2 — серии рифтов в Восточно-Лаптевской провинции горстов и грабен; 3 — Усть-Ленскому рифту; 4 — Лено-Таймырской зоне пограничных поднятий; 5, 6 — Верхоянской складчатой системе и руслу р. Лены; 7 — складчатой системе хребта Черского.

Таким образом, семь выделенных относительно узких и вытянутых областей соответствуют определению сейсмолинеаментов как осей сейсмоактивных разломных структур. В то же время обширные площади коры вне сейсмолинеаментов, где линеаменты, выделенные разными способами, не совпадают по положению и не подтверждены выраженной цепочкой эпицентров землетрясений, могут рассматриваться как сейсмодомены, т. е. квазиоднородные объемы геологической среды, характеризующиеся рассеянной сейсмичностью. При этом для выделения сейсмодоменов также нужно ориентироваться на крупные относительно однородные тектонические структуры — в данном случае таковыми могут быть Сибирская платформа, котловины Нансена и Амундсена и т. д.

Заключение

В настоящей статье на примере Лаптевоморского региона продемонстрированы особенности выделения линеаментов регионального масштаба

в акватории морей геоморфометрическими методами, используя в качестве исходных данных ЦМР (батиметрическую модель) и модель поля силы тяжести в редукции Буге. Результаты исследования выявили эффективность методов теневого анализа и выделения килевых форм с помощью расчета кривизны рельефа для выявления крупных сейсмолинеаментов при условии совместного использования результатов геоморфометрического анализа с данными о распределении эпицентров землетрясений.

Представленный подход к выделению сейсмолинеаментов может оказаться весьма перспективным для разработки ЛДФ-моделей зон ВОЗ обширных шельфовых зон России, для которых нет необходимого объема геолого-геофизических и палеосейсмологических данных. При этом вследствие недостатка точности ЦМР и моделей силы тяжести для акваторий возможно выделение лишь протяженных сейсмолинеаментов регионального масштаба. При разработке более детальных ЛДФ-моделей необходимо знать точную геометрию и протяженность участков, вскрывающихся при единовременной сейсмической подвижке, что требует проведения комплекса инженерно-геологических и инженерно-геофизических работ в пределах обширных акваторий.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания № FMWE-2024-0019 (применение теневого анализа и выделение килевых форм с помощью расчета кривизны рельефа дна) и гранта РФФИ № 23-17-00125 (анализ результатов геоморфометрического анализа совместно с данными о сейсмичности и активных разломах для выделения сейсмолинеаментов), а также государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус», Соглашение № 18-03 от 10.09.2024 (частично: обработка морских экспедиционных данных).

Список источников

1. Тверитинова Т.Ю. Линеаменты как отражение структурного каркаса литосферы (Линеаменты — разломы или фантомы?) [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. — 2013. — Т. 4. — Вып. 1: Система Планета Земля. — Режим доступа: <https://e-almanac.space-time.ru/assets/files/Tom%204%20Vip%201/rubr2-st7-tveritinovatyu.pdf> (дата обращения: 13.08.2024).
2. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф. Основы линеаментной тектоники. — М.: Недра, 1986. — 144 с.
3. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2006. — Т. 3. — № 2. — С. 177–183.
4. Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. — М.: ГЕОС, 2015. — 108 с.
5. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. — М.: ГЕОС, 2016. — 424 с.
6. Гильманова Г.З., Рыбас О.В., Горошко М.В. Применение преобразованных цифровых моделей рельефа для геолого-структурного районирования крупных блоков земной коры // Тихоокеанская геология. — 2011. — Т. 30. — № 6. — С. 33–42.
7. Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В. Линеаментный анализ космических изображений сейсмоопасных территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т. 9. — № 4. — С. 213–222.
8. Анохин В.М., Маслов Л.А. Опыт изучения закономерностей направленности и протяженности линеаментов и разломов в регионах // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о земле. — 2015. — № 1 (25). — С. 7–18.
9. Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М., Черемных А.В. Некоторые возможности линеаментного анализа при картировании разноранговых разломов (на примере Прибайкалья) // Исследование Земли из космоса. — 2022. — № 3. — С. 66–83. DOI: 10.31857/S020596142203006X.
10. Купцова О.В. Дешифрирование разломов юго-западной части острова Сахалин // Вестник СГУГиТ. — 2022. — Т. 27. — № 1. — С. 52–60. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-52-60.

11. *GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gebco.net/> (дата обращения: 13.08.2024).
12. *Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Шкарубо С.И.* Неотектонические нарушения шельфа Баренцева моря и их генезис по данным морфометрии рельефа дна, сейсморазведки и глубинному строению мантии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 509. – № 1. – С. 62–68. DOI: 10.31857/S2686739722602484.
13. *Гаврилов А.А.* Космогеологическая индикация морфоструктурных элементов побережий и дна прилегающих акваторий (залив Петра Великого, Японское море) // Океанология. – 2021. – Т. 61. – № 4. – С. 633–648. DOI: 10.31857/S0030157421040043.
14. *Гаврилов А.А.* Новые данные о строении подводных возвышенностей Богорова, Тояма и прилегающих участков дна Японского моря (по результатам геоморфологических и космогеологических исследований) // Исследование Земли из космоса. – 2022. – № 3. – С. 17–29. DOI: 10.31857/S0205961422030058.
15. *Пояснительная записка к комплексу карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016* // Инженерные изыскания. – 2016. – № 7. – С. 49–122.
16. *Драчев С.С.* Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. – 2000. – № 6. – С. 43–56.
17. *Аветисов Г.П., Зинченко А.Г., Мусатов Е.Е., Пискарев А.Л.* Сейсмическое районирование Арктического региона // Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. – С.162–175.
18. *Арктический бассейн (геология и морфология)* / Гл. ред. В.Д. Каминский. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2016. – 291 с.
19. *Драчев С.С.* О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. – 2002. – № 6. – С. 60–76.
20. *Рекант П.В., Гусев Е.А.* Признаки новейших тектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине по данным сейсмоакустического профилирования // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2009. – № 2(82). – С. 85–94.
21. *Lambeck K., Rouby H., Porsell A., Sun Y., Sambridge M.* Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111. – No. 43. – P. 15296–15303. DOI: 10.1073/pnas.1411762111.
22. *Баранов Б.В., Флинт М.В., Римский-Корсаков Н.А., Поярко С.Г., Дозорова К.А.* Структурные свидетельства современной активности Хатангско-Ломоносовской зоны разломов в море Лаптевых // Доклады академии наук. – 2018. – Т. 480 – № 3. – С. 344–347. DOI: 10.7868/S0869565218150185.
23. *Аветисов Г.П., Голубков В.С.* Тектоно-сейсмическое районирование Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана и сопредельных акваторий // Геология и полезные ископаемые севера Сибирской платформы. – Л.: НИИГА, 1971. – С. 66–73.
24. *Кузин И.П.* Обзорное сейсмическое районирование шельфов северных окраинных морей СССР (на примере моря Лаптевых) // Морская сейсмология и сейсмометрия / Отв. ред. С.Л. Соловьев. – М.: Институт океанологии, 1989. – 150 с.
25. *Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97.* Масштаб 1 : 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта; В.И. Уломов, Л.С. Шумилина. – М., ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта, 1999. – 57 с.
26. *International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/arctic_ocean (дата обращения: 13.08.2024).
27. *Bonvalot S., Briais A., Kuhn M., Peyrefitte A., Vales N., Biancale R., Gabalda G., Moreaux G., Reinquin F., Sarrailh M.* Global grids: World Gravity Map (WGM2012) [Электронный ресурс] / Bureau Gravimetrique International. – 2012. – Режим доступа: <https://bgi.obs-mip.fr/grids-and-models-2/> (дата обращения: 13.08.2024). DOI: 10.18168/bgi.23.
28. *Устинов С.А., Петров В.А.* Использование детальных цифровых моделей рельефа для структурно-линеamentного анализа (на примере Уртуйского гранитного массива, ЮВ Забайкалье) // Геоинформатика. – 2016. – № 2. – С. 51–60.
29. *Шарый П.А.* Геоморфометрия в науках о земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарского научного центра РАН. – 2006. – Т. 8. – № 2. – С. 458–473.
30. *Мальцев К.А., Мухарамова С.С.* Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer). – Казань: Казанский университет, 2014. – 103 с.
31. *Drachev S.S., Mazur S., Campbell S., Green C., Shkarubo S.I., Tishchenko A.* Crustal architecture of the Laptev Rift System in the East Siberian Arctic based on 2D long-offset seismic profiles and gravity modeling // Petroleum Geoscience. – 2018. – Vol. 24. – Iss. 4. – pp. 402–413. DOI: 10.1144/petgeo2016-143.
32. *Рекант П.В., Леонтьев Д.И., Петров Е.О.* Неотектонический этап развития Арктического бассейна. Начало, основные события, связь тектоники и осадконакопления // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 81. – С. 60–72.
33. *Крылов А.А., Лобковский Л.И., Рукавишников Д.Д., Баранов Б.В., Ковачев С.А., Дозорова К.А., Цуканов Н.В., Семилетов И.П.* Новые данные о сейсмотектонике моря Лаптевых по наблюдениям донных сейсмостанций // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 507. – № 1. – С. 98–103. DOI: 10.31857/S2686739722601582.
34. *Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Дозорова К.А., Цуканов Н.В.* Система разломов, контролирующая метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // Доклады академии наук. – 2019. – Т. 486. – № 3. – С. 354–358. DOI: 10.31857/S0869-56524863354-358.
35. *Богоявленский В.И., Казанин Г.С., Кишанков А.В.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых // Бурение и нефть. – 2018. – № 5. – С. 20–28.
36. *Богоявленский В.И., Казанин А.Г., Кишанков А.В., Казанин Г.А.* Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. – 2021. – Т. 11. – № 2. – С. 178–194. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-178-194.
37. *Гусев Е.А., Зайончек А.В., Мэннис М.В., Рекант П.В., Рудой А.С., Рыбаков К.С., Черных А.А.* Прилаптевоморское окончание хребта Гаккеля // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – Вып. 4. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. – С. 40–54.

38. Имаева Л.П., Имаев В.С., Мельникова В.И., Козьмин Б.М. Новейшие структуры и тектонические режимы напряженно-деформированного состояния земной коры северо-восточного сектора российской Арктики // Геотектоника. – 2016. – № 6. – С. 3–22. DOI: 10.7868/S0016853X16060035.
39. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сейсмотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // Геотектоника. – 2019. – № 5. – С. 62–77. DOI: 10.31857/S0016-853X2019562-77.
40. Карта доплиоценовых образований: S-50-52. Государственная геологическая карта Российской Федерации (новая серия). Схема использованных материалов. Лист 1, масштаб: 1:1000000 / ФГУ НПП «Аэрогеология»; ред. А.Ю. Егоров, Е.П. Сурмилова. – 2000.
41. Карта дочетвертичных образований: S-51 (Оленекский зал.); S-52 (дельта р.Лены). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Лаптево-Сибирскоморская серия. Геологическая карта дочетвертичных образований, масштаб: 1:1000000, серия: Лаптево-Сибирскоморская / ОАО МАГЭ, ФГБУ «ВСЕГЕИ»; ред.: В.Ф. Проскурнин, С.И. Шкарубо. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2014.
42. Лукина Н.В., Патык-Кара Н.Г., Соколов С.Ю. Неотектонические структуры и активные разломы Арктического шельфа России // Геология и полезные ископаемые шельфов России. Атлас / Ред. М.Н. Алексеев. – М.: Научный мир, 2004. – Л. 3–3, 3–4.
43. Шипилов Э.В., Шкарубо С.И., Богданов Н.А., Хаин В.Е. О тектоно-геодинамических взаимоотношениях областей молодого океанообразования с континентальными окраинами Арктики (Шпицбергенской и Лаптевоморской) // Комплексные исследования природы Шпицбергена. – Вып. 3. – Апатиты: КНЦ РАН, 2003. – С. 41–58.
44. Юсупов В.И., Салюк А.Н., Карнаух В.Н., Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // Доклады академии наук. – 2010. – Т. 430. – № 6. – С. 820–823. DOI:10.1029/2005GB002668.
45. Региональные комплексные геофизические исследования с целью оценки перспектив нефтегазоносности Центрально-Лаптевского района и осадочных бассейнов Лаптевоморской континентальной окраины: отчет по гос. контракту № 15/03/70-20 от 06.07.2009 г. / МАГЭ, отв. исп. Т.А. Кириллова. – Мурманск, 2011.
46. Региональные комплексные геофизические исследования Притаймырского района моря Лаптевых с целью оценки перспектив нефтегазоносности: отчет по гос. контракту № 20/03/70-23 от 18.05.2011 г. / МАГЭ; отв. исп.: В.В. Шлыкова. – Мурманск, 2013.
47. Региональные комплексные геофизические исследования в северо-западной части моря Лаптевых с целью оценки перспектив нефтегазоносности: отчет по гос. контракту № 25/03/70-14 от 03.04.2012 г. / МАГЭ; отв. исп. Е.А. Фомина. Мурманск, 2014.
48. Комплексные региональные геофизические исследования в зоне сочленения Лаптевской окраинно-материковой плиты со структурами Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО): отчет по гос. контракту № 15/18/520-2 от 31.07.2017 г. / АО Севморнефтегеофизика; отв. исп. Е.А. Васильева. – Москва, 2019.
49. Аветисов Г.П. Глубинная структура Новосибирских островов и прилегающих акваторий по сейсмологическим данным // Советская геология. – 1982. – № 11. – С. 113–122.
50. Аветисов Г.П. Гипоцентрия и фокальные механизмы землетрясений дельты р. Лены и ее обрамления // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 6. – С. 59–69.
51. Ковачев С.А., Кузин И.П., Соловьев С.Л. Кратковременное изучение микросейсмичности губы Буор-Хая, море Лаптевых, с помощью донных сейсмографов // Физика Земли. – 1994. – № 7–8. – С. 65–76.
52. Крылов А.А., Иващенко А.И., Ковачев С.А., Цуканов Н.В., Куликов М.Е., Медведев И.П., Ильинский Д.А., Шахова Н.Е. Сейсмотектоника и сейсмичность Лаптевоморского региона: состояние вопроса и первый опыт годичной постановки донных сейсмостанций на шельфе // Вулканология и сейсмология. – 2020. – № 6. – С. 33–49. DOI: 10.31857/S0203030620060140.
53. Крылов А.А., Лобковский Л.И., Ковачев С.А., Баранов Б.В., Рукавишников Д.Д., Цуканов Н.В., Дозорова К.А., Семилетов И.П. Геодинамические режимы в Лаптевоморском регионе согласно новейшим сейсмологическим данным // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 513. – № 2. – С. 224–234. – DOI: 10.31857/S2686739723601783.
54. База данных «Землетрясения России [электронный ресурс] / Единая геофизическая служба РАН. – 2002–2024. – Режим доступа: <http://eqru.gsras.ru/> (дата обращения: 14.08.2024).
55. International Seismological Centre (ISC) [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.isc.ac.uk/> (дата обращения: 14.08.2024).
56. Search Earthquake Catalog / U.S. Geological Survey [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения: 14.08.2024 г.).

References

1. Tveritina T.Yu. Lineaments as a reflection of the lithosphere's structural carcass. (Are lineaments the faults or phantoms?). *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2013;4(1). Available at: <https://e-almanac.space-time.ru/assets/files/Tom%204%20Vip%201/rubr2-st7-tveritinovatyu.pdf> (accessed 13.08.2024 г.).
2. Kats Ya.G., Poletaev A.I., Rumyantseva E.F. Osnovy lineamentnoi tektoniki [Fundamentals of lineament tectonics]. Moscow: Nedra; 1986. 144 p.
3. Bondur V.G., Zverev A.T. Fizicheskaya priroda lineamentov, registriruemyykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seismoopasnykh territorii [Physical nature of lineaments recorded on satellite images during monitoring of seismically hazardous areas]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2006;3(2):177–183.
4. Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M. Ispol'zovanie dannykh distantsionnogo zondirovaniya uchastkov zemnoi kory dlya analiza geodinamicheskoi obstanovki [Using remote sensing data from areas of the earth's crust to analyze the geodynamic situation]. Moscow: GEOS; 2015. 108 p.
5. Kocharyan G.G. Geomekhanika razlomov [Geomechanics of faults]. Moscow: GEOS; 2016. 424 p.
6. Gil'manova G.Z., Rybas O.V., Goroshko M.V. Application of modified digital terrain models for geomorphological demarcation of large blocks of the Earth's crust. *Russian journal of Pacific geology*. 2011;5(6):509–517. DOI: 10.1134/S1819714011060042.

7. Bondur V.G., Zverev A.T., Gaponova E.V. Geodynamic features of seismic areas of Russia, based on lineament analysis. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012;9(4):213–222.
8. Anokhin V.M., Maslov L.A. Experience study regularity of direction and length for lineaments and faults in regions. *Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-scientific center»*. *Earth sciences*. 2015;(1):7–18.
9. Ivanchenko G.N., Gorbunova E.M., Cheremnykh A.V. Some possibilities of lineament analysis for mapping different rated faults (for Cisbaikalia example). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2022;(3):66–83. DOI: 10.31857/S020596142203006X.
10. Kuptsova O.V. Decoding of faults in the southwestern part of Sakhalin island. *Vestnik of SSUGT*. 2022;27(1):52–60. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-52-60.
11. GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans. Available at: <https://www.gebco.net/> (accessed 13.08.2024).
12. Sokolov S.Yu., Abramova A.S., Shkarubo S.I. Neotectonic dislocations at the Barents sea shelf and their genesis according to the morphometry of bathymetry, seismic sections and the deep mantle structure. *Doklady Rossijskoj Akademii Nauk. Nauki o Zemle*. 2023;509(1):62–68. DOI: 10.31857/S2686739722602484.
13. Gavrilov A.A. Satellite geological indication of morphostructural elements of the coasts and bottom of adjacent water areas (Peter the Great bay, sea of Japan). *Oceanology*. 2021;61(4):555–568. DOI: 10.1134/S0001437021040044.
14. Gavrilov A.A. New data on the structure of Bogorov, Toyama underwater rises and adjacent areas of the sea of Japan bottom (based on the results of geomorphological and cosmogeological investigations). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2022;(3):17–29.
15. Poyasnitel'naya zapiska k komplektu kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossijskoj Federatsii OSR-2016 [Explanatory note to the set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-2016]. *Engineering survey*. 2016;(7):49–122.
16. Drachev S.S. Tectonics of the Laptev sea rift system. *Geotektonika*. 2000;(6):43–56.
17. Avetisov G.P., Zinchenko A.G., Musatov E.E., Piskarev A.L. Seismicheskoe raionirovanie Arkticheskogo regiona [Seismic zoning of the Arctic region]. In: *The Russian Arctic: geological history, mineragenesis, environmental geology*. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya; 2002. pp. 162–175.
18. Kaminskii V.D. (ed.) Arkticheskii bassein (geologiya i morfologiya) [Arctic basin (geology and morphology)]. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya; 2016. 291 p.
19. Drachev S.S. On the basement tectonics of the Laptev sea shelf. *Geotektonika*. 2002;(6):60–76.
20. Rekant P.V., Gusev E.A. Priznaki noveishikh tektonicheskikh dvizhenii na Laptevomorskoj kontinental'noi okraine po dannym seismoakusticheskogo profilirovaniya [Signs of recent tectonic movements on the Laptev Sea continental margin according to seismoacoustic profiling data]. *Arctic and Antarctic research*. 2009;(2):85–94.
21. Lambeck K., Rouby H., Porsell A., Sun Y., Sambridge M. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111(43):15296–15303. DOI: 10.1073/pnas.1411762111.
22. Baranov B.V., Flint M.V., Rimskiy-Korsakov N.A., Poyarkov S.G., Dozorova K.A. Structural evidence of recent activity of the Khatanga–Lomonosov fault zone in the Laptev sea. *Doklady Earth sciences*. 2018;480(1):671–673. DOI: 10.1134/S1028334X18050215.
23. Avetisov G.P., Golubkov V.S. Tektono-seismicheskoe raionirovanie Evrazijskogo basseina Severnogo Ledovitogo okeana i sopredel'nykh akvatorii [Tectonoseismic zoning of the Eurasian basin of the Arctic Ocean and adjacent waters]. In: *Geologiya i poleznye iskopaemye severa Sibirskoi platformy*. Leningrad: NIIGA; 1971. pp. 66–73.
24. Kuzin I.P. Obzornoe seismicheskoe raionirovanie shelf'ov severnykh okrainnykh morei SSSR (na primere morya Laptevykh) [Survey seismic zoning of the shelves of the northern marginal seas of the USSR (using the example of the Laptev Sea)]. In: *Morskaya seismologiya i seismometriya*. Soloviev S.L., ed. Moscow: Institut okeanologii; 1989. 150 p.
25. Ulomov V.I., Shumilina L.S. (eds.) Komplekt kart obshchego seismicheskogo raionirovaniya territorii Rossijskoj Federatsii OSR-97. Masshtab 1 : 8 000 000. Ob'yasnitel'naya zapiska i spisok gorodov i naselennykh punktov, raspolozhennykh v seismoopasnykh raionakh [Set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation OSR-97. Explanatory note and list of cities and towns located in earthquake-prone areas]. Moscow: OIFZ im. O.Yu. Shmidta; 1999. 57 p.
26. *International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO)*. Available at: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/arctic_ocean (accessed 13.08.2024).
27. Bonvalot S., Briais A., Kuhn M., Peyrefitte A., Vales N., Biancalde R., Gabalda G., Moreaux G., Reinquin F., Sarraillh M. Global grids: World Gravity Map (WGM2012). 2012. Available at: <https://bgi.obs-mip.fr/grids-and-models-2/> (accessed 13.08.2024). DOI: 10.18168/bgi.23.
28. Ustinov S.A., Petrov V.A. Use of detailed digital relief models for the structural and lineament analysis (on example of the Urtuysky granite massif, SE Transbaikalia). *Geoinformatika*. 2016;(2):51–60.
29. Shary P.A. Geomorphometry in earth sciences and ecology, an overview of methods and applications. *Izvestia of Samara Scientific Center of the RAS*. 2006;8(2):458–473.
30. Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S. Postroenie modelei prostranstvennykh peremennykh (s primeneniem paketa Surfer) [Construction of models of spatial variables (using the Surfer package)]. Kazan': Kazanskii universitet; 2014. 103 p.
31. Drachev S.S., Mazur S., Campbell S., Green C., Shkarubo S.I., Tishchenko A. Crustal architecture of the Laptev Rift System in the East Siberian Arctic based on 2D long-offset seismic profiles and gravity modeling. *Petroleum Geoscience*. 2018;24(4):402–413. DOI: 10.1144/petgeo2016-143.
32. Rekant P.V., Leontiev D.I., Petrov E.O. Neotectonic stage of the Arctic basin evolution: new ideas, timing and regional correlation. *Regional geology and metallogeny*. 2020;81:60–72.
33. Krylov A.A., Lobkovskiy L.I., Rukavishnikova D.D., Baranov B.V., Kovachev S.A., Dozorova K.A., Tsukanov N.V., Semiletov I.P. New data on seismotectonics of the Laptev sea from observations by ocean bottom seismographs. *Doklady Earth Sciences*. 2022;507(1):98–103. DOI: 10.1134/S1028334X22600591.
34. Baranov B.V., Lobkovskiy L.I., Dozorova K.A., Tsukanov N.V. The fault system controlling methane seeps on the shelf of the Laptev sea. *Doklady Earth Sciences*. 2019;486(1):571–574. DOI: 10.1134/S1028334X19050209.
35. Bogoyavlenskiy V., Kazanin G., Kishankov A. Dangerous gas-saturated objects in the World ocean: the Laptev sea. *Burenie i neft'*. 2018;(5):20–28.

36. Bogoyavlensky V.I., Kazanin A.G., Kishankov A.V., Kazanin G.A. Earth degassing in the Arctic: comprehensive analysis of factors of powerful gas emission in the Laptev sea. *Arctic: ecology and economy*. 2021;11(2):178–194. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-178-194.
37. Gusev E.A., Zayonchek A.V., Mennies M.V., Rekant P.V., Roudoy A.S., Rybakov K.S., Chernyh A.A. The end of the Gakkel ridge in the Laptev sea. In: Geological-geophysical features of the lithosphere of the Arctic Region. Iss. 4. St.Petersburg: VNIIOkeangeologiya; 2002. pp. 40–54.
38. Imaeva L.P., Imaev V.S., Mel'nikova V.I., Koz'min B.M. Recent structures and tectonic regimes of the stress–strain state of the Earth's crust in the northeastern sector of the Russian Arctic region. *Geotectonics*. 2016;50(6):535–552. DOI: 10.7868/S0016853X16060035.
39. Imaeva L.P., Imaev V.S., Gusev G.S. Dynamics of the relief and seismotectonic activity of the modern structures in the delta of the river Lena. *Geotectonics*. 2019;53(5):588–600. DOI: 10.1134/S0016852119050029.
40. Egorov A.Yu., Surmilova E.P. (eds.) Karta dopliotsenovykh obrazovaniy: S-50-52. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii (novaya seriya). Skhema ispol'zovannykh materialov. List 1, masshtab: 1 : 1 000 000 [Map of pre-Pliocene formations: S-50-52. State geological map of the Russian Federation (new series). Diagram of materials used. Sheet 1, scale: 1 : 1 000 000]. 2000.
41. Proskurnin V.F., Shkarubo S.I. (eds.) Karta dochetvertichnykh obrazovaniy: S-51 (Olenekskii zal.); S-52 (del'ta r.Leny). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Tret'e pokolenie. Laptevo-Sibirskomorskaya seriya. Geologicheskaya karta dochetvertichnykh obrazovaniy, masshtab: 1 : 1 000 000, seriya: Laptevo-Sibirskomorskaya [Map of pre-Quaternary formations: S-51 (Olenyoksky Bay); S-52 (delta of the Lena river). State geological map of the Russian Federation. Third generation. Laptev-Siberian Sea series. Geological map of pre-Quaternary formations, scale: 1 : 1 000 000, series: Laptev-Siberian Sea]. St.Petersburg: VSEGEI; 2014.
42. Lukina N.V., Patyk-Kara N.G., Sokolov S.Yu. Neotektonicheskie struktury i aktivnye razlomy Arkticheskogo shelf'a Rossii [Neotectonic structures and active faults of the Russian Arctic shelf]. In: Geologiya i poleznye iskopaemye shelf'fov Rossii. Atlas. Alekseev M.N., ed. Moscow: Nauchnyi mir; 2004. Sheets 3-3, 3-4.
43. Shipilov E.V., Shkarubo S.I., Bogdanov N.A., Khain V.E. O tektono-geodinamicheskikh vzaimootnosheniyakh oblastei molodogo okeanoobrazovaniya s kontinental'nymi okrainami Arktiki (Shpitsbergenskoj i Laptevomorskoi) [On the tectono-geodynamic relationships of areas of young ocean formation with the continental margins of the Arctic (Spitsbergen and Laptev Sea)]. In: Kompleksnye issledovaniya prirody Shpitsbergena. Apatity: KNTS RAN; 2003. pp. 41–58.
44. Yusupov V.I., Salyuk A.N., Karnaukh V.N., Semiletov I.P., Shakhova N.E. Detection of methane ebullition in shelf waters of the Laptev sea in the eastern Arctic region. *Doklady Earth Sciences*. 2010;430(2):261–264. DOI: 10.1134/S1028334X1002025X.
45. Kirillova T.A. (resp. exec.) Regional'nye kompleksnye geofizicheskie issledovaniya s tsel'yu otsenki perspektiv neftegazonosnosti Tsentral'no-Laptevsckogo raiona i osadochnykh basseinov Laptevomorskoi kontinental'noi okrainy: otchet po gos. kontraktu № 15/03/70-20 ot 06.07.2009 g. [Regional comprehensive geophysical studies to assess the oil and gas potential of the Central Laptev region and sedimentary basins of the Laptev Sea continental margin: report on the government contract No. 15/03/70-20 dated 07/06/2009]. MAGEH. Murmansk; 2011.
46. Shlykova V.V. (resp. exec.) Regional'nye kompleksnye geofizicheskie issledovaniya Pritaimyrskogo raiona morya Laptevykh s tsel'yu otsenki perspektiv neftegazonosnosti: otchet po gos. kontraktu № 20/03/70-23 ot 18.05.2011 g. [Regional integrated geophysical studies of the Pritaimyr region of the Laptev Sea in order to assess oil and gas prospects: report on the government contract No. 20/03/70-23 dated 05/18/2011]. MAGEH. Murmansk; 2013.
47. Fomina E.A. (resp. exec.) Regional'nye kompleksnye geofizicheskie issledovaniya v severo-zapadnoi chasti morya Laptevykh s tsel'yu otsenki perspektiv neftegazonosnosti: otchet po gos. kontraktu № 25/03/70-14 ot 03.04.2012 g. [Regional integrated geophysical research in the northwestern part of the Laptev Sea to assess oil and gas prospects: report on the government contract No. 25/03/70-14 dated 04/03/2012]. MAGEH. Murmansk, 2014.
48. Vasil'eva E.A. (resp. exec.) Kompleksnye regional'nye geofizicheskie issledovaniya v zone sochleneniya Laptevskoi okrainno-materikovoj plity so strukturami Evrazijskogo basseina Severnogo Ledovitogo okeana (SLO): otchet po gos. kontraktu № 15/18/520-2 ot 31.07.2017 g. [Comprehensive regional geophysical research in the junction zone of the Laptev marginal continental plate with the structures of the Eurasian basin of the Arctic Ocean (AO): report on the government contract No. 15/18/520-2 dated 31/07/2017]. AO Sevmorneftegeofizika. Moscow, 2019.
49. Avetisov G.P. Glubinnaya struktura Novosibirskikh ostrovov i prilgayushchikh akvatorii po seismologicheskim dannym [Deep structure of the New Siberian Islands and adjacent water areas according to seismological data]. *Sovetskaya Geologiya*. 1982;(11):113–122.
50. Avetisov G.P. Earthquake hypocenters and focal mechanisms in the delta of the Lena river and its surroundings. *Vulkanologiya i seismologiya*. 1991;(6):59–69.
51. Kovachev S.A., Kuzin I.P., Solov'ev S.L. Kratkovremennoe izuchenie mikrozeismichnosti guby Buor-Khaya, more Laptevykh, s pomoshch'yu donnykh seismografov [Short-term study of microseismicity in Buor-Khaya Bay, Laptev Sea, using bottom seismographs]. *Fizika Zemli*. 1994;(7-8):65–76.
52. Krylov A.A., Ivashchenko A.I., Kovachev S.A., Tsukanov N.V., Kulikov M.E., Medvedev I.P., Ilinskiy D.A., Shakhova N.E. The seismotectonics and seismicity of the Laptev sea region: the current situation and a first experience in a year-long installation of ocean bottom seismometers on the shelf. *Journal of volcanology and seismology*. 2020;(6):33–49. DOI: 10.1134/S0742046320060044.
53. Krylov A.A., Lobkovsky L.I., Kovachev S.A., Baranov B.V., Rukavishnikova D.D., Tsukanov N.V., Dozorova K.A., Semiletov I.P. Geodynamic regimes in the Laptev Sea region according to the latest seismological data. *Doklady Earth Sciences*. 2023;513(2):224–234. DOI: 10.31857/S2686739723601783.
54. Baza dannykh «Zemletryaseniya Rossii [Database “Earthquakes of Russia”]. Unified Geophysical Service of the RAS. Available at: <http://eqru.gsr.ru/> (accessed 14.08.2024).
55. International Seismological Centre (ISC). Available at: <https://www.isc.ac.uk/> (accessed 14.08.2024).
56. Search Earthquake Catalog. U.S. Geological Survey. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (accessed 14.08.2024).

Статья поступила в редакцию 10.06.2024 г., одобрена после рецензирования 25.06.2024 г., принята к публикации 21.11.2024 г.
The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 25.06.2024; accepted for publication 21.11.2024.

Информация об авторах

Либина Наталия Викторовна

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
ФГБУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук»
117997 Москва, Нахимовский пр-кт, д. 36
e-mail: Inatvit@mail.ru
SPIN-код: 8971-7458
AuthorID: 610119

Крылов Артём Александрович

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ФГБУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук»
117997 Москва, Нахимовский пр-кт, д. 36
Научно-технологический университет «Сириус»
354340 Краснодарский край, федеральная территория
«Сириус», Олимпийский пр-кт, д. 1
e-mail: artyomkrlv@ocean.ru
SPIN-код: 8570-3310
AuthorID: 904347

Рукавишникова Дарья Дмитриевна

Научный сотрудник
ФГБУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук»
117997 Москва, Нахимовский пр-кт, д. 36
e-mail: drukavishnikova@gmail.com
SPIN-код: 5417-3730
AuthorID: 560170

Ковачев Сергей Анатольевич

Кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
ФГБУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук»
117997 Москва, Нахимовский пр-кт, д. 36
e-mail: kovachev@ocean.ru
SPIN-код: 5929-2047
AuthorID: 58626

Баранов Борис Викторович

Кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией опасных геологических процессов
ФГБУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук»
117997 Москва, Нахимовский пр-кт, д. 36
e-mail: bbaranov@ocean.ru
ORCID: 0000-0002-1965-320X
Scopus ID: 7003790464
ResearcherID: R-5689-2016
AuthorID: 65382

Information about authors

Natalia V. Libina

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997, Russia
e-mail: Inatvit@mail.ru
SPIN-код: 8971-7458
AuthorID: 610119

Artem A. Krylov

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997, Russia
Sirius University of Science and Technology
1, Olympic Ave., Sirius Federal Territory, Krasnodar region,
354340, Russia
e-mail: artyomkrlv@ocean.ru
SPIN-код: 8570-3310
AuthorID: 904347

Daria D. Rukavishnikova

Researcher
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997, Russia
e-mail: drukavishnikova@gmail.com
SPIN-код: 5417-3730
AuthorID: 560170

Sergey A. Kovachev

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Leading Researcher
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997, Russia
e-mail: kovachev@ocean.ru
SPIN-код: 5929-2047
AuthorID: 58626

Boris V. Baranov

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Head of the Laboratory of Hazardous Geological Processes
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997, Russia
e-mail: bbaranov@ocean.ru
ORCID: 0000-0002-1965-320X
Scopus ID: 7003790464
ResearcherID: R-5689-2016
AuthorID: 65382