ISSN 1609-364X (print)

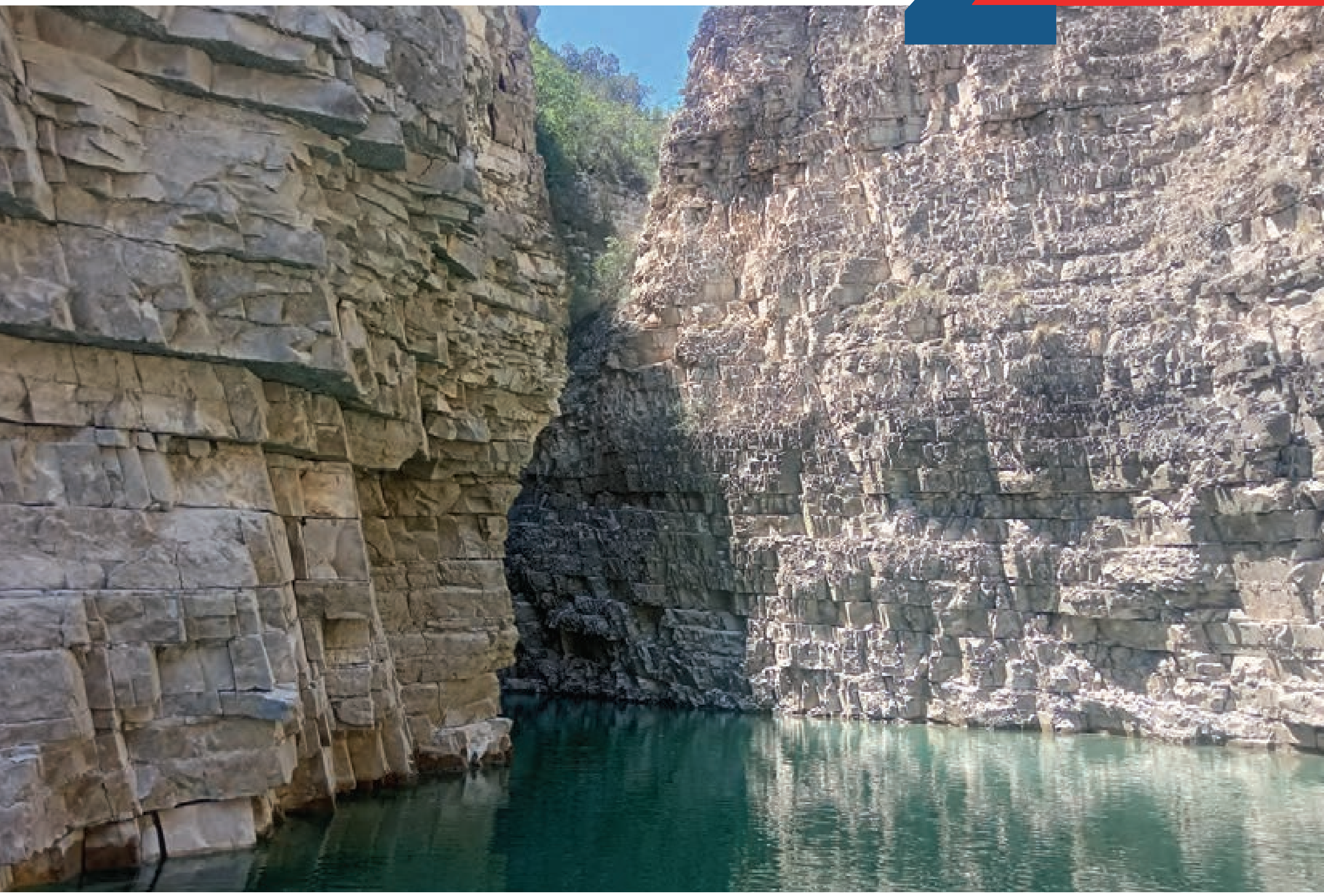
ГЕОИНФОРМАТИКА

Журнал о геоинформационных технологиях
в геологии и геоэкологии

2

Издается
с 1992 года

2024



GEOINFORMATIKA

Journal of geoinformation technologies
in geology and geoecology

Since 1992

УЧРЕДИТЕЛИ / FOUNDERS

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации
Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation

Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра)
Federal Agency for Subsoil Use (Rosnedra)

Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ФГБУ «ВНИГНИ»)
Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Geological Oil Institute" (VNIGNI)

Государственный университет «Дубна»
Dubna State University

2
2024

ГЕОИНФОРМАТИКА

Журнал о геоинформационных технологиях в геологии и геоэкологии

GEOINFORMATIKA

Journal of geoinformation technologies in geology and geoecology

КОНТАКТЫ

Материалы для публикации направлять по адресу:
Россия, 117105, Москва, Варшавское шоссе, 8, журнал «Геоинформатика»
Тел.: (495) 952-21-57, факс: (495) 954-24-47
E-mail: artur@geosys.ru, a.sidorova@geosys.ru, i.khalyavkina@geosys.ru
Сайт журнала – www.geoinformatika.ru, www.geosys.ru
Подписка на журнал: Почта России, индекс – ПБ850; ООО «УП УРАЛ-ПРЕСС», индекс – 72104
Дизайн, верстка: А.Э. Сидорова, И.А. Халявкина
Отпечатано в отделении Геоинформатики ФГБУ «ВНИГНИ»
Заказ № 3. Подписано в печать 26.06.2024
Тираж 300 экземпляров
Фото на обложке: В. Спиридонов

CONTACT INFORMATION

Please send manuscripts to the address:
117105, Moscow, Russia, Varshavskoye shosse, 8, "Geoinformatics" magazine
Phone: (495) 952-21-57, fax: (495) 954-24-47
E-mail: artur@geosys.ru, a.sidorova@geosys.ru, i.khalyavkina@geosys.ru
Magazine website – www.geoinformatika.ru, www.geosys.ru
Subscription index: Russian Post – ПБ850, OOO Agency "Ural-Press" – 72104
Design and layout: A.E. Sidorova, I.A. Khalyavkina
Printed in the department of Geoinformatics of FSBI "VNIGNI"
Order № 3. Signed for print 26.06.2024
Circulation: 300 copies
Cover photo: V. Spiridonov

Москва
Moscow

2024

Геоинформатика. 2024. № 2. С. 12–24.
Geoinformatika. 2024;(2):12–24.

Применение ГИС-технологий

Научная статья
УДК 528.8.04:001.51
https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-2-12-24

Анализ связи сейсмичности и особенностей потенциальных полей Лено-Анабарского прогиба: опыт использования современных ГИС-технологий

© 2024 г. — Альбина Семеновна Кулядндина[1, 2, a)], Елена Юрьевна Соколова[3, 4, b)], Алена Игоревна Филиппова[5, c)]

[1]Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова; Россия, Якутск

[2]Якутский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба» РАН; Россия, Якутск

[3]ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт» (ВНИГНИ); Россия, Москва

[4]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН; Россия, Москва

[5]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН; Россия, Москва, Троицк

[a)]albineku28@gmail.com, [b)]sokol_l@mail.ru, [c)]aleirk@mail.ru

Аннотация: В статье показана связь между сейсмичностью и особенностями магнитного и гравитационного полей Лено-Анабарского прогиба и сопредельных территорий (Северо-Западная Якутия) на базе использования современного комплекса ГИС INTEGRO. Представлен обзор региональной сейсмичности, зарегистрированной за инструментальный период наблюдений (1963–2022 гг.) по данным сети стационарных станций Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Потенциальные поля анализировались по картам, обобщающим результаты съемок в масштабе 1:200 000. Технологии ГИС INTEGRO позволили выявить основные особенности пространственной морфологии и расчетных статистических параметров потенциальных полей, а также сопоставить их с известными тектоническими структурами и картиной сейсмичности исследуемой территории. Результаты проведенного анализа наглядно продемонстрировали корреляцию аномальных характеристик гравитационного и магнитного полей с распределением сейсмических событий, что является хорошей предпосылкой дальнейшего проведения геофизического моделирования для выяснения в прогнозных целях глубинной структурно-тектонической приуроченности очагов землетрясений Северо-Западной Якутии.

Ключевые слова: ***Лено-Анабарский прогиб; дельта р. Лены; сейсмичность; геомагнитное и гравитационное поля; аномальные и статистические характеристики геофизических полей; ГИС INTEGRO.***

Для цитирования: Кулядндина А.С., Соколова Е.Ю., Филиппова А.И. Анализ связи сейсмичности и особенностей потенциальных полей Лено-Анабарского прогиба: опыт использования современных ГИС-технологий // Геоинформатика. — 2024. — № 2. — С. 12–24. https://doi.org/ 10.47148/1609-364X-2024-2-12-24.

Application of GIS-technologies

Original article

Analysis of relation between seismicity and features of potential fields within the Lena-Anabar trough: experience of usage modern GIS-technologies

© 2024 — Albina S. Kulyandina[1,2, a)], Elena Yu. Sokolova[3, 4, b)], Alena I. Filippova[5, c)]

[1] M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; Yakutsk, Russia

[2] Yakutsk Branch of Federal Research Center, Geophysical Survey of RAS; Yakutsk, Russia

[3] All-Russian Research Geological Oil Institute; Moscow, Russia

[4] Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS; Moscow, Russia

[5] Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS; Russia, Moscow, Troitsk

[a)]albineku28@gmail.com, [b)]sokol_l@mail.ru, [c)]aleirk@mail.ru

Abstract: In this paper, we study a relation between seismicity and features of geomagnetic and gravity fields within the Lena-Anabar trough and adjacent areas (northwestern Yakutia) applying the modern GIS INTEGRO software. A review of regional seismicity, registered during the instrumental observation period (1963–2022) from data of permanents seismic station network of the Yakutsk Branch of FRC GS RAS, is presented. The potential fields were analyzed based on maps compiling results of 1 : 200 000 surveys. Technologies of GIS INTEGRO allowed us to trace the main features of the spatial morphology and calculated statistical parameters of the potential fields and to compare them with known tectonic structures and a seismicity distribution within the study region. The results of the performed analysis clearly demonstrate a correlation of anomalous characteristics of gravity and magnetic fields with earthquake epicenter locations. This is a good premise for further geophysical modeling aimed at revealing structural and tectonic features of earthquake sources in northwestern Yakutia.

Keywords: *Lena-Anabar trough; Lena River delta; seismicity; geomagnetic and gravity fields; anomalous and statistical characteristics of geophysical fields; GIS INTEGRO.*

For citation: Kulyandina A.S., Sokolova E.Yu., Filippova A.I. Analysis of relation between seismicity and features of potential fields within the Lena-Anabar trough: experience of usage modern GIS-technologies. *Geoinformatika.* 2024;(2):12–24. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2024-2-12-24. In Russ.

Введение

Лено-Анабарский прогиб и прилегающие к нему территории представляют огромный потенциал для освоения и эксплуатации природных ресурсов, таких как нефть, газ, уголь, алмазы, золото и другие полезные ископаемые. Лено-Анабарский прогиб простирается в субширотном направлении более чем на 1000 км и имеет форму длинной полосы, изогнутой к югу. В тектоническом плане он граничит на западе с Анабаро-Хатангской седловиной, на востоке переходит в Предверхоянский краевой прогиб (рис. 1) [1]. С юга прогиб ограничен Куойско–Далдынским и Оленекским сводами, которые осложняют северную часть Анабарской мегантиклизы, а с севера — Оленекской складчато-надвиговой зоной (см. рис. 1). Лено-Анабарский прогиб является синклинальной асимметричной структурой, состоящей из пологого приплатформенного и крутого прискладчатого бортов. Приплатформенный борт прогиба характеризуется сокращенными мощностями слоев осадочного чехла и их моноклинальным залеганием, отражающим общий региональный наклон поверхности фундамента [2]. Внешний борт прогиба характеризуется структурными осложнениями в виде террас, структурных мысов, флексурных перегибов, довольно интенсивной складчатости и многочисленных разломов. К этому борту приурочена полоса небольших прогибаний осадочной толщи [3].

К территории исследования тяготеет Лено-Таймырская зона землетрясений (рис. 2), которая прослеживается в субширотном направлении от дельты р. Лены через Оленекский и Анабарский заливы моря Лаптевых и прибрежные районы до п-ова Таймыр [4]. За период инструментальных наблюдений (1963–2022 гг.) здесь зарегистрировано более 50 000 сейсмических событий, магнитуда для большинства которых не превышает 4,5 (по данным Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН). Используемый авторами статьи каталог землетрясений можно считать представительным с энергетического класса $K_p = 7{,}6$, что соответствует магнитуде $MS = 2{,}0$. Наиболее сильными событиями в пределах рассматриваемой территории являются землетрясения 1 февраля 1980 г. с $M_w = 5{,}3$, $mb = 5{,}4$ и 25 ноября 1987 г. с $mb = 5{,}1$ [5, 6], произошедшие в восточной и западной частях побережья Оленекского залива соответственно, землетрясения 20 мая 1963 г. с mb=5,0 [5, 7, 8] и 1 марта 1991 г. с $M_w = 5{,}0$ [9] на востоке дельты р. Лены, а также землетрясение 21 июля 1964 г. с $M = 5{,}4$ в губе Буор-Хая [7, 10]. Очаги землетрясений, приуроченных к Оленекскому заливу моря Лаптевых, сформированы под влиянием преобладающего северо-восточного-юго-западного растяжения [7], в то время как для дельты р. Лены характерно большое разнообразие типов подвижек в очагах землетрясений, свидетельствующее о неоднородном напряженно-деформируемом состоянии земной коры [11]. В тектоническом отношении основные проявления местной сейсмичности сконцентрированы в пределах Лено-Анабарского краевого шва, являющегося северной границей Сибирской платформы (см. рис. 1), и в дельте р. Лены.

Цель данной статьи — установить возможные связи между геофизическими полями и сейсмичностью для Лено-Анабарского прогиба и прилегающих территорий.

Материалы и методы

Изучение связи сейсмичности с особенностями потенциальных полей представляет собой сложную задачу, требующую применения современных ГИС-технологий. В проведенной работе для этой цели использовался комплекс ГИС INTEGRO [13]. Исходными материалами служили карты гравитационного и магнитного полей, составленные по результатам съемок в масштабе 1:200 000, а также каталог землетрясений 1963–2022 гг., сформированный в Якутском филиале ФИЦ ЕГС РАН (см. рис. 2). В комплексе ГИС INTEGRO возможен всесторонний анализ геофизических данных для выяснения их пространственных взаимосвязей. В проведенной работе в этих целях анализировались пространственные градиенты потенциальных полей, а также результаты их разделения на локальную и региональную составляющие с выделением линейных аномалий по локальным компонентам. Выявленные особенности различных характеристик гравитационного и аномального магнитного полей были сопоставлены с распределением эпицентров землетрясений за инструментальный период наблюдений.

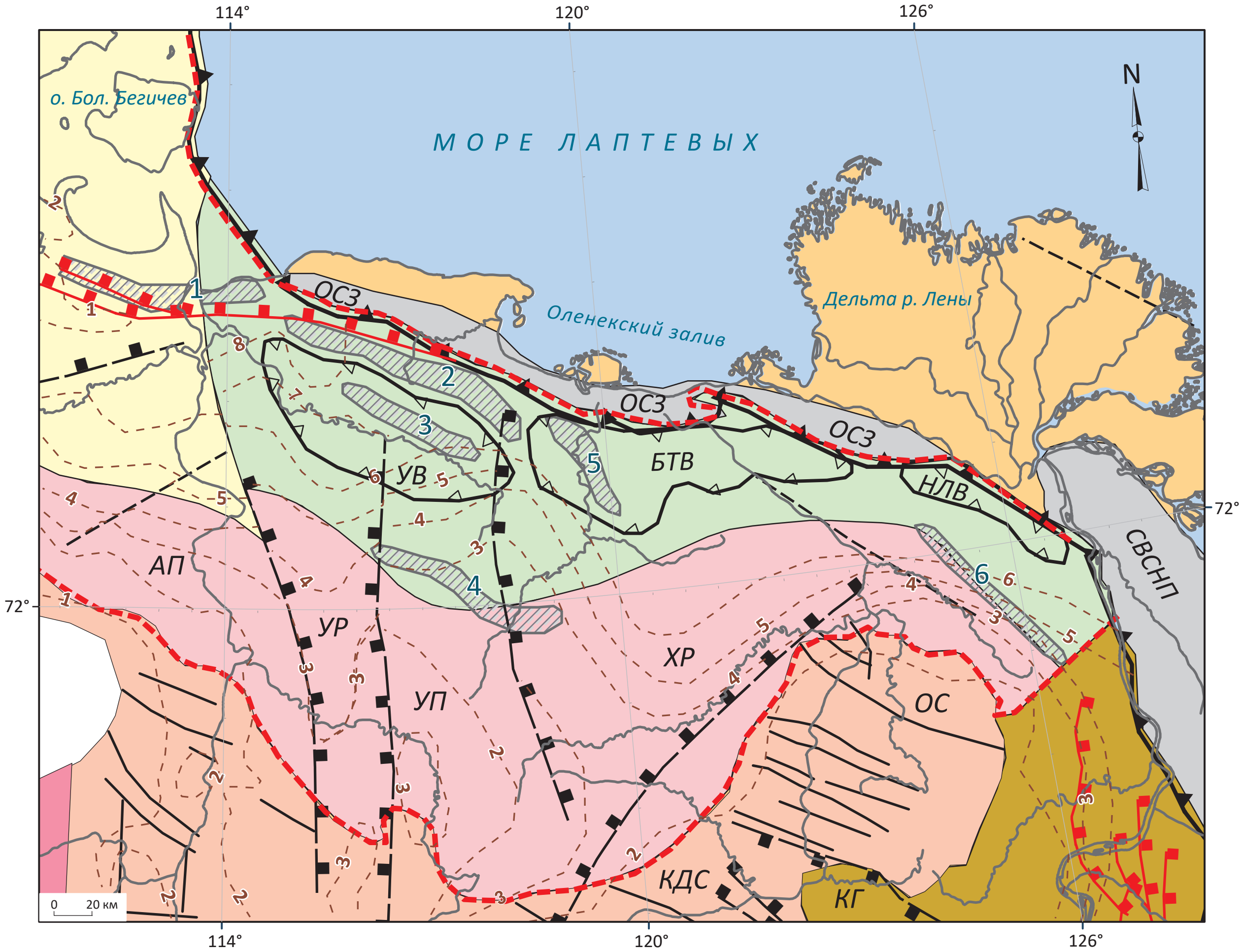
С помощью градиентных характеристик поля наиболее эффективно решается задача выделения границ между аномалиями или различными стационарными областями. В ГИС INTEGRO при каждом положении скользящего окна исходное поле в нем методом наименьших квадратов аппроксимируется полиномом второго порядка:

$$F = C_0 + C_X \times X + C_Y \times Y + C_{XY} \times X \times Y + C_{XX} \times X^2 + C_{YY} \times Y^2, \quad (1)$$

где F — исходное поле в окне; C_0–C_{YY} — коэффициенты полинома; X и Y — локальные координаты в окне (начало координат в середине окна, ось X идет вдоль профиля, ось Y — вдоль линии равных

Рис. 1. Тектоническая карта Лено-Анабарского прогиба и сопредельных территорий (по [1])

Fig. 1. Tectonic map of the Lena-Anabar trough and adjacent areas according (to [1])



Архей-палеопротерозойский фундамент Сибирского кратона/*Archean-Paleoproterozoic basement of the Siberian Craton*

Осадочный чехол Сибирского кратона *Siberian Craton sedimentary cover*

Предверхояно-Вилюйский краевой прогиб/ *Priverkhoyansk-Vilyui marginal trough*

Чехол плиоцен-четвертичных отложений рифтовой системы моря Лаптевых/ *Pliocene-Quaternary sediments of the Laptev Rift System*

Северо-Сибирская моноклиналь/ *North Siberian Monocline*

Анабаро-Хатангская седловина/ *Anabar-Khatanga Saddle*

Лено-Анабарский бассейн/ *Anabar-Lena Basin*

Лено-Анабарский прогиб/ *Lena-Anabar trough*

Мезозойские складчато-надвиговые пояса *Mesozoic fold and thrust belts*

Ударный кратер Попигай (Палеоген)/ *Paleogene Popigai Impact Crater*

1 2 3 4 5 6 7 8 9

1 — границы Лено-Анабарского прогиба; ***2*** — депоцентры; ***3*** — валы; ***4*** — изолинии глубин залегания кристаллического фундамента; ***5*** — краевые швы; ***6*** — основные взбросы; ***7*** — разломы; ***8*** — неуточненные разломы; ***9*** — обобщенные границы рифтовых бассейнов (выведенные на основе гравитационных данных)

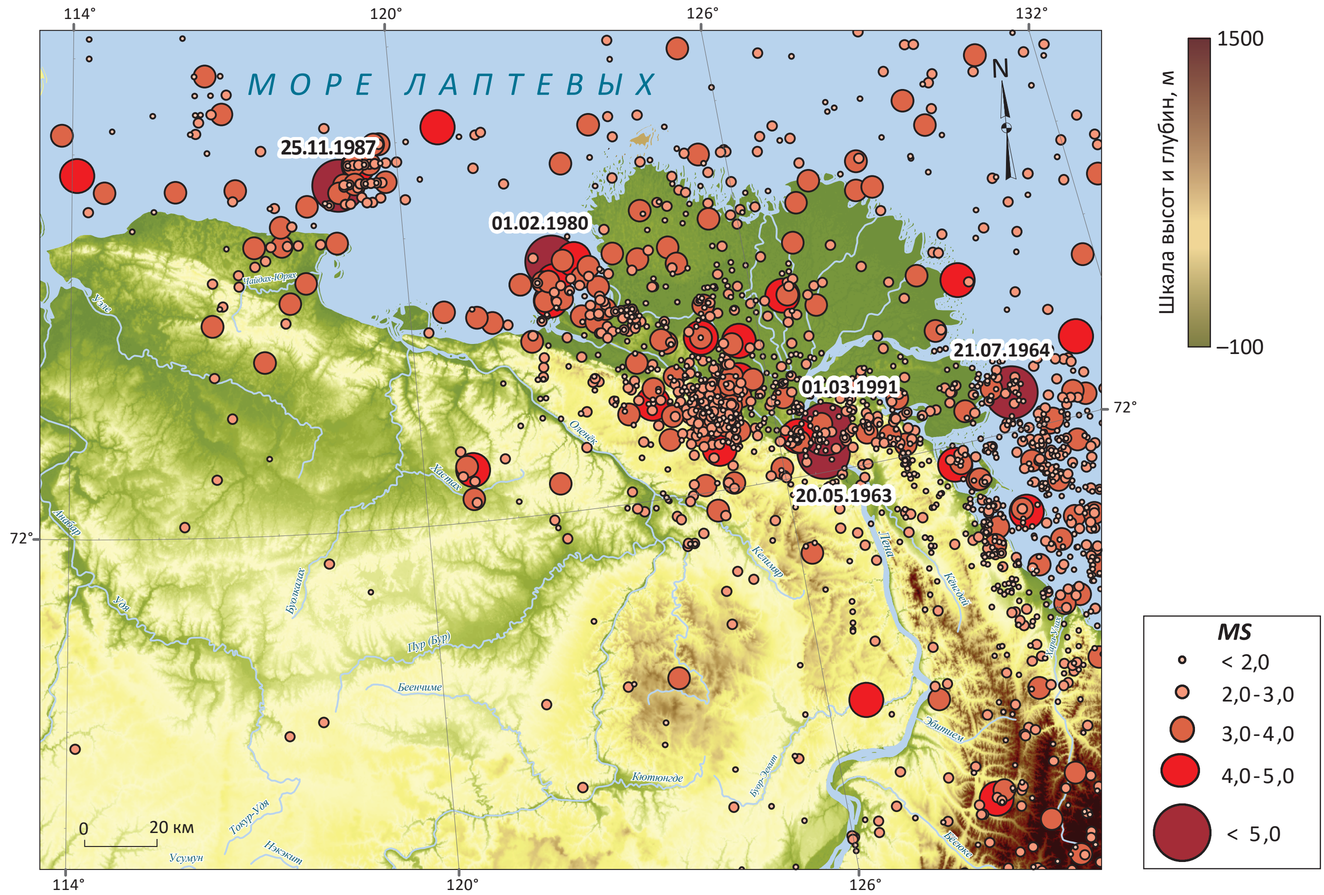
__1__ — Lena-Anabar trough boundaries; __2__ — depocenters; __3__ — swells; __4__ — crystalline basement depth, km; __5__ — marginal sutures; __6__ — main thrusts; __7__ — faults; *__8__ — uncertain faults;* ***9*** *— generalized margins of rift basins (inferred from gravity data)*

Инверсионные валы: **1** — Тигян-Анабарский, **2** — Киренейский, **3** — Сасыл-Юряхский, **4** — Кангаллах-Уэлинский, **5** — Буолкалахский, **6** — Келимьяр-Куогастахский. **Впадины**: БТВ — Буолкалах–Таймылырская, НЛВ — Нижне-Ленская, УВ — Уелинская. **Своды, поднятия**: АП — Анабарское поднятие, КДС — Куойско–Далдынский свод, ОС — Оленекский свод, УП — Уджинское поднятие. **Рифты и грабены**: УР — Уджинский, ХР — Хастахский, КГ — Кютингдинский грабен. **Другие обозначения**: ОСЗ — Оленекская складчатая зона, СВСНП — Северо-Верхоянский складчато-надвиговый пояс.

__Inverted swells__: __1__ — Tigyan-Anabar; __2__ — Kirenei; __3__ — Sasyl-Yuryakh; __4__ — Kangallakh-Uele; __5__ — Buolkalakh; __6__ — Kelimyar-Kuogastakh. __Troughs__: BT — Buolkalakh–Taimylyr; NL — Nizhne–Lena; U — Uyelin. __Basement highs and arches__: AH — Anabar High; KDA — Kuoisk-Daldynsk Arch; OH —Olenek High; UH-Udzha High. __Rifts and grabens__: UR — Udzha; KR — Khastakh; KG — Kyutingda Graben. __Other letters__: OFZ — Olenek Fold Zone; NVFTB — North Verkhoyansk Fold and Thrust Belt.

Рис. 2. Эпицентры региональных землетрясений за 1963–2022 гг. по данным Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Магнитуды (*MS*) пересчитаны из энергетических классов по Раутиан ($K_р$) с использованием соотношений из работы [12]. Даты приведены для землетрясений с $M \geq 5{,}0$

Fig. 2. Epicenters of regional earthquakes in 1963–2022 according to the Yakutsk branch of FRC GS RAS data. Magnitudes (MS) are calculated from Rautian energy classes ($K_р$) using relation from [12]. Dates are plotted for earthquakes with $M \geq 5{,}0$



пикетов, шаги dX и dY совпадают с аналогичными параметрами исходного поля).

Коэффициенты подобранного полинома определяют компоненты градиента поля:

- производная поля вдоль простирания профилей (по долготе) $G_X = C_X$;
- производная поля вкрест простирания профилей (по широте) $G_Y = C_Y$.

Модуль полного градиента и угол его направления рассчитываются по компонентам градиента.

Вычисления градиентов потенциальных полей территории Лено-Анабарского прогиба и смежных территорий проводились по значениям полей, попавшим в скользящее окно, размерами 81 × 81 км — для гравитационного и в окне 51 × 51 км — для магнитного.

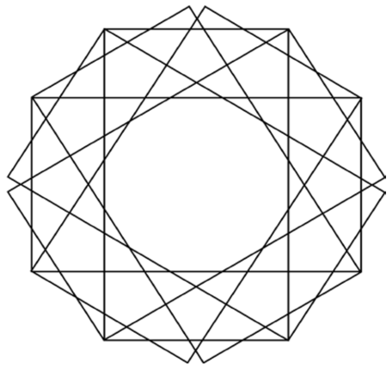
Для картирования линейных объектов в области исследования использовалась процедура ГИС INTEGRO, предназначенная для обнаружения линейных элементов поля. Процедура позволяет обнаруживать слабые линейные аномалии неизвестного простирания, но известной формы в сечении на фоне различных случайных помех. Процедура основана на методе, который использует статистику ранговой корреляции Спирмена [14] и не требует допущений о характере помехи. Использовалось статистическое окно, имеющее форму прямоугольника. Так как направление простирания аномалии неизвестно, то применяется последовательное обнаружение прямоугольными окнами одинаковых размеров, но имеющими разные направления (рис. 3).

Для обнаружения линеаментов магнитного и гравитационного полей вычислялся коэффициент ранговой корреляции Спирмена между образом искомой аномалии и наблюденным полем в окне с параметрами 15 000 × 7 500 м.

Значения искомой аномалии в окне представляется выборкой $u_1, u_2, \ldots, u_n$, а значения поля в скользящем окне — выборкой $v_1, v_2, \ldots, v_n$.

Рис. 3. Последовательность окон обнаружения линейных аномалий неизвестного простирания (6 направлений через 30°)

Fig. 3. Sequence of windows for detecting linear anomalies of unknown strike (6 directions at 30° intervals)



Каждая выборка ранжируется по возрастанию числел от 1 до n, причем совпадающие значения ранжируются между собой произвольным образом, а затем получают один и тот же ранг, равный среднему арифметическому их первоначальных рангов. Обозначим ранги аномалии через $i_1, i_2, \ldots, i_n$, а поля — через $j_1, j_2, \ldots, j_n$. Для определения коэффициента ранговой корреляции по Спирмену (R) вычисляется сумма квадратов ранговых разностей (d):

$$d = \sum_{k=1}^{n} (i_k - j_k)^2. \tag{2}$$

Кроме того, для каждой выборки определяется фактор корреляции (T_u — для аномалии и T_v — для поля):

$$T = \sum_{l=1}^{m} \frac{t_l^3 - t_l}{12}, \tag{3}$$

где суммирование проводится по совпадающим рангам и t обозначает число одинаковых значений для данного ранга. Затем вычисляется коэффициент ранговой корреляции по Спирмену:

$$R = \frac{\dfrac{n^3 - n}{6} - \left(T_u + T_v\right) - d}{\sqrt{\left(\dfrac{n^3 - n}{6} - 2T_u\right) \times \left(\dfrac{n^3 - n}{6} - 2T_v\right)}}. \tag{4}$$

Пороговые значения для статистики Спирмена не зависят от закона распределения помехи (лишь бы он был непрерывным и центрированным) и вычисляются в программе без экспериментов на безаномальном участке.

Вычисленные или определенные экспериментально пороги используются для нормирования статистики:

$$R_n = \frac{R - h_{5\%}}{h_{1\%} - h_{5\%}}, \tag{5}$$

где $h_{5\%}$ — пороговое значение для уровня значимости 5 %; $h_{1\%}$— пороговое значение для уровня значимости 1 %.

Таким образом, значение 0 нормированной статистики соответствует 5 %-му порогу, а значение 1 — 1 %-му. Такое нормирование дает возможность легко сравнивать результаты обнаружения различными методами с разными окнами и параметрами.

Модель поля предполагает нулевое среднее помехи, поэтому перед проведением операции предполагается центрирование помехи, на практике заменяемое выделением остаточной компоненты поля.

Наличие линейных аномалий и направление их осей определяются в ходе анализа значений статистик в точке наблюдения по всему вееру расчетных направлений. Итоговое построение штриха определенного направления в данной точке означает, что есть статистические основания для принятия решения о наличии обнаруживаемой линейной аномалии, при этом направление ее оси фиксируется направлением штриха.

Результаты

Отражение особенностей геолого-тектонического строения региона исследования в аномалиях потенциальных полей

С помощью вышеописанных технологий на первом этапе анализа были выявлены характерные черты потенциальных полей региона Лено-Анабарского прогиба, а также проведено их сопоставление с имеющимися сведениями о его геолого-тектоническом строении.

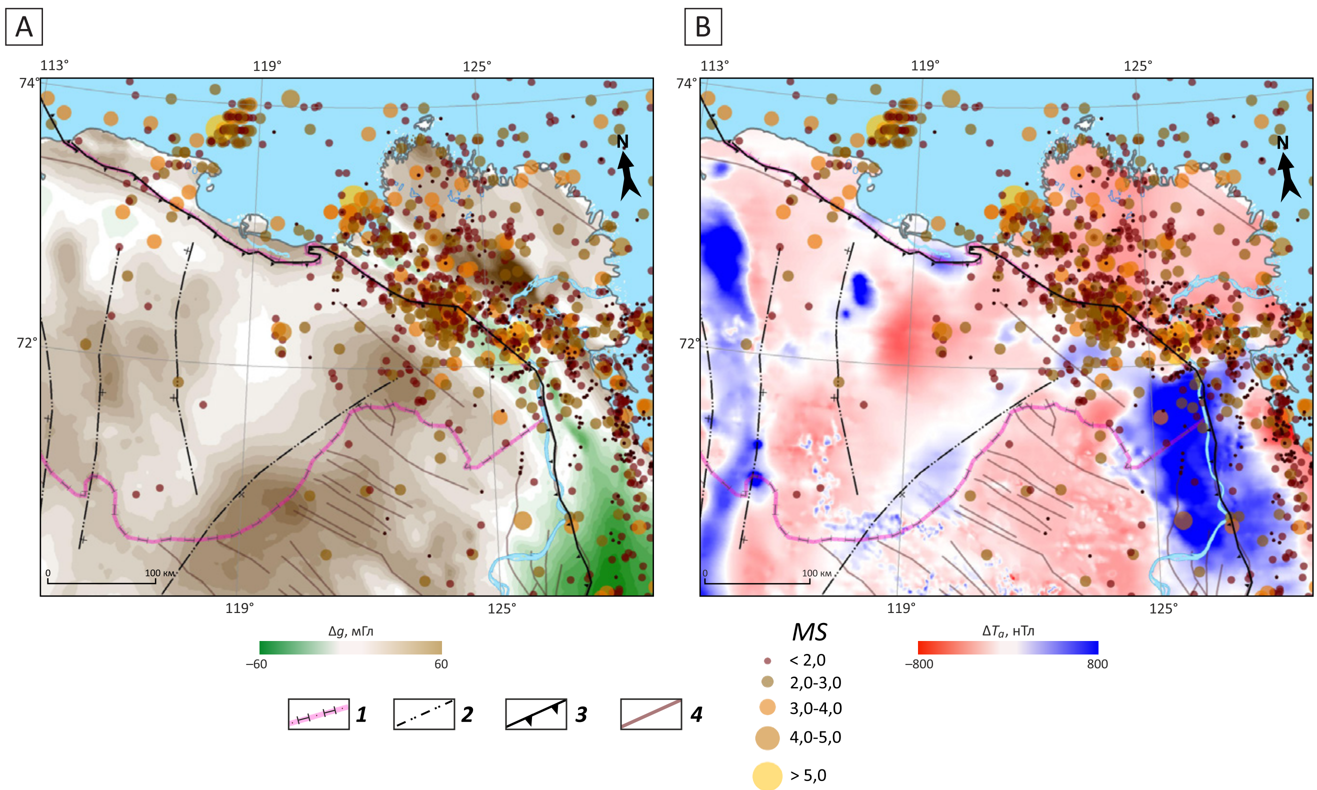
По направлению систем изодинам ΔT_a и изоаномалий Δg рассматриваемая территория отчетливо разделяется на две области (рис. 4). Первая, область их плавного дугообразного перехода от северо-западного к почти субмеридиональному простиранию, отвечает структурам северо-восточного обрамления Сибирской платформы. Лено-Анабарский краевой шов и сопряженная с ним Оленекская складчатая зона (ОСЗ), протягивающиеся вдоль северного борта Лено-Анабарского прогиба, отмечены линейным гравитационным максимумом и несколькими локальными повышениями магнитного поля. Далее, юго-восточное продолжение краевого шва — граница краевых прогибов и Северо-Верхоянского складчатого пояса — характеризуется линейным минимумом поля силы тяжести и окаймляет с востока интенсивную региональную магнитную аномалию, фиксирующую Хорбусуонский рифтогенный прогиб (выделяемый в [15], а на рис. 1 отмеченный серией сбросов в прибортовой части Оленекского выступа). Обрамление платформы наиболее контрастно выражено дугообразными аномалиями в поле градиента силы тяжести и его аргумента (см. рис. 5 A, C) и отчетливыми цепочками линейных локальных аномалий поля силы тяжести (см. рис. 6 C, D). Кроме того оно отмечено отдельными магнитными аномалиями различной амплитуды (рис. 6 A, B). На территории дельты р. Лены интенсивные аномалии гравитационного поля сохраняют северо-западную ориентировку и отражают структурный план соответствующего продолжения Северо-Верхоянского складчатого пояса, а также горстов и грабенов Лаптевоморской системы рифтов. В магнитном поле дельты отмечаются только достаточно слабые локальные повышения (см. рис. 5, 6).

На площади изучения, расположенной к югу и юго-западу от рассмотренных ранее, направления изолиний гравитационного и аномального магнитного полей резко меняются, отражая внутреннюю архитектуру этой части северо-востока платформы (см. рис. 4). В гравитационном поле Лено-Анабарского прогиба аномальные длинноволновые компоненты обусловлены, главным образом, пологими вариациями рельефа кристаллического архей-протерозойского фундамента, отличающегося значительным плотностным контрастом по отношению к вышележащим терригенно-карбонатным палеозойским и слагающим основную мощность осадочного чехла терригенным мезозойским толщам [1, 15, 18]. Наиболее интенсивные и обширные максимумы поля силы тяжести ассоциируются с Оленекским сводом и (несколько слабее) Уджинским поднятием. Их разделяет Хастахский минимум, который отвечает глубокой впадине одноименного палеорифта. Полоса Лено-Анабарского осадочного бассейна характеризуется существенным, обусловленным значительным погружением кровли фундамента, понижением гравитационого поля, которое на юго-востоке переходит в интенсивный минимум еще более глубокого бассейна краевого Предверхоянского прогиба (см. рис. 4 A).

По характеру аномальных полей ΔT_a и Δg изучаемую территорию северо-востока платформы можно разделить на Лено-Оленекское и Оленек-Анабарское междуречья: области наиболее приподнятого положения фундамента (сильно дис-

Рис. 4. Сейсмичность исследуемой территории (1963–2022 гг.) по данным Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН на основе фрагментов карт аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя 2,67 г/см³ [16] (A) и модуля полного вектора аномального геомагнитного поля на высоте 200 м [17] (B)

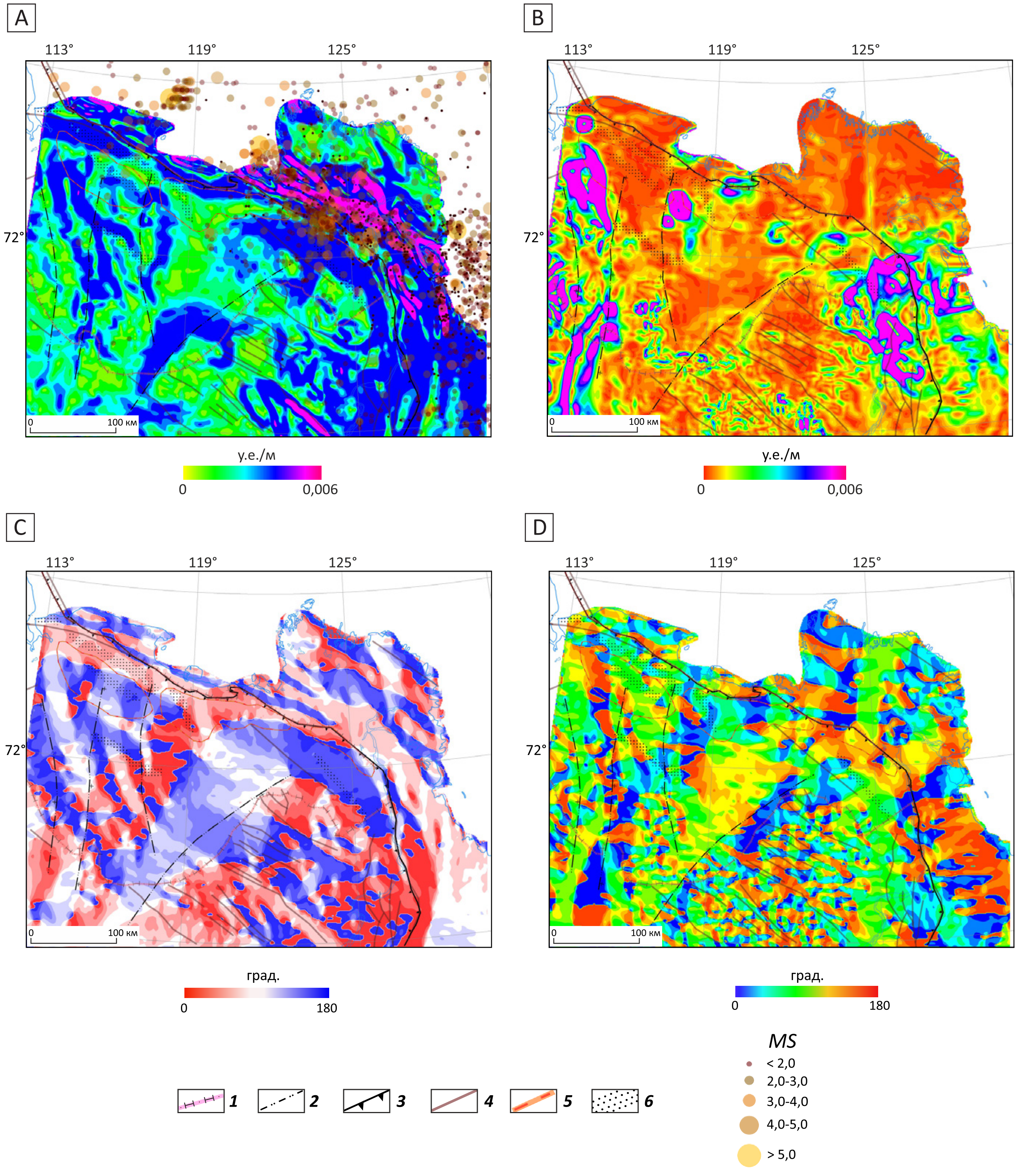
Fig. 4. Seismicity of the study region (1963–2022) according to the Yakutsk branch of FRC GS RAS data on the basis of maps of gravity anomalies in the Bouguer reduction with an intermediate layer density of 2,67 g/cm³ [16] (A) *and total intensity of magnetic anomalies at 200 m altitude [17]* (B)



1 — границы Лено-Анабарского прогиба; **2** — обобщенные границы рифтовых бассейнов; **3** — краевые швы; **4** — разломы
1 — Lena-Anabar trough boundaries; 2 — generalized margins of rift basins; 3 — marginal suture; 4 — faults

Рис. 5. Линейные положительные максимумы полного градиента поля силы тяжести (гравитационные ступени разных порядков) с наложенной сейсмичностью (А) и аномалий магнитного поля (В) исследуемого участка. Направление градиента гравитационного (С) и магнитного (D) полей, град.

Fig. 5. Linear positive maxima of the total gradient of the gravity (gravitational steps of different ranks) (A) *and magnetic field anomalies* (B) *within the study area. The seismicity is superimposed on panel* (A). *The direction of the gradient of gravity* (C) *and magnetic* (D) *fields, degrees*

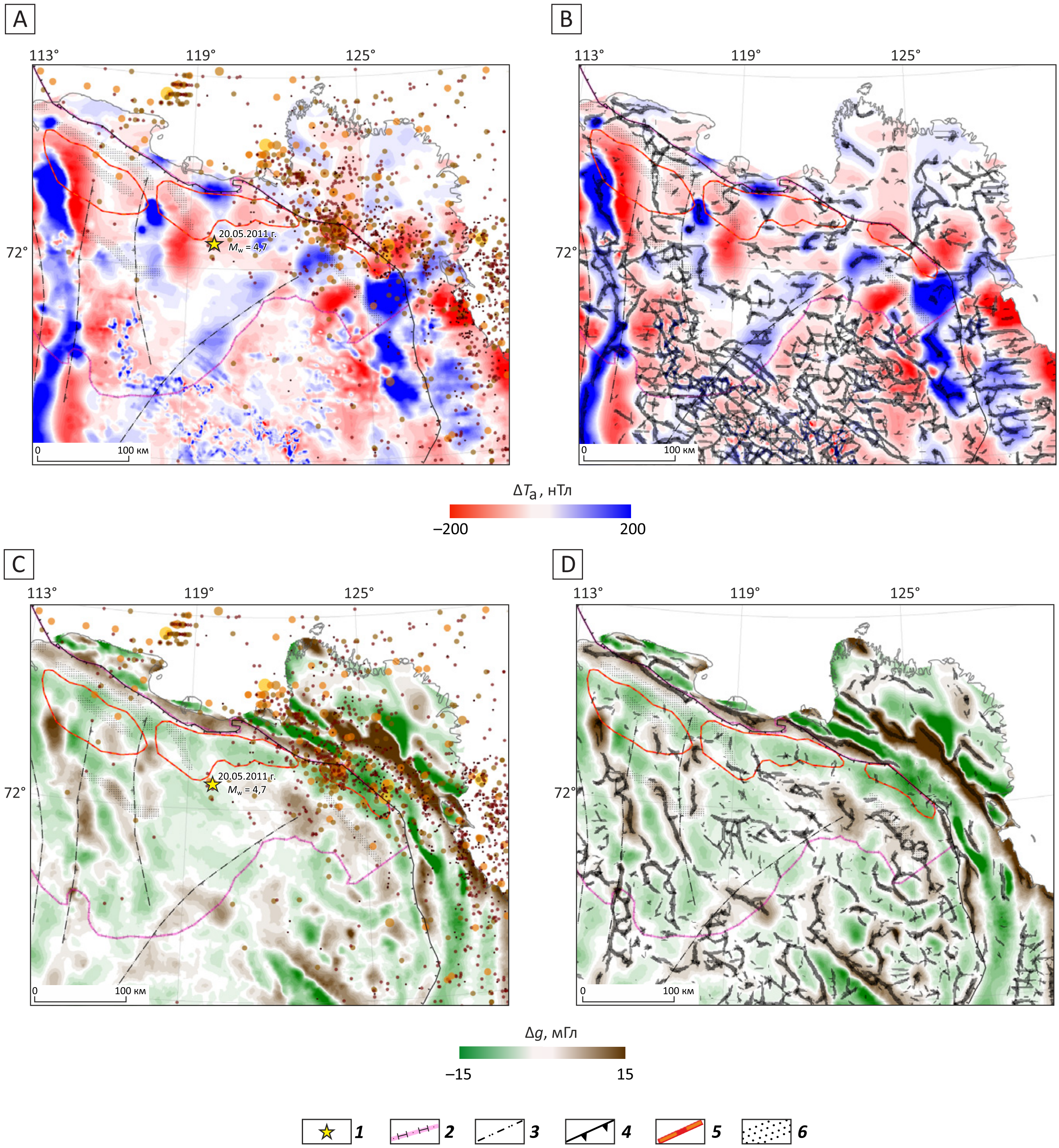


1 — границы Лено-Анабарского прогиба; ***2*** — обобщенные границы рифтовых бассейнов; ***3*** — краевые швы; ***4*** — разломы; ***5*** — депоцентры; ***6*** — валы

***1** — Lena-Anabar trough boundaries;* ***2** — generalized margins of rift basins;* ***3** — marginal suture;* ***4** — faults;* ***5** — depocenters;* ***6** —swells*

Рис. 6. Локальные аномалии магнитного (A) и гравитационного (C) полей, результаты обнаружения линейных положительны аномалий магнитного (B) и гравитационного (D) полей

Fig. 6. Local anomalies of magnetic (A) *and gravity* (C) *fields, results of detection of linear positive local anomalies of magnetic* (B) *and gravity* (D) *fields*



1 — Хастахское землетрясение; **2** — границы Лено-Анабарского прогиба; **3** — обобщенные границы рифтовых бассейнов; **4** — краевые швы; **5** — депоцентры; **6** — валы

1 — Khastakh earthquake; 2 — Lena-Anabar trough boundaries; 3 — generalized margins of rift basins; 4 — marginal suture; 5 — depocenters; 6 — swells лоцированного и изменчивого по составу пород) и области его перекрытия значительной толщей мезозойских осадков, соответственно.

Для первой из этих областей характерны изрезанные, градиентные, аномальные потенциальные поля (см. рис. 5, 6). Округлые или продолговатые, часто хаотичной ориентировки и небольших размеров (от 5 × 6 до 15 × 20 км) локальные магнитные аномалии (рис. 6 A) отвечают разнообразным магматическим образованиям: разновозрастным (от рифея до верхней юры) вулканогенным трапповым и интрузивным комплексам, а также кимберлитам [18]. Вместе с тем, область Хорбусуонского рифта отмечена очень крупной магнитной аномалией, вероятнее всего, обусловленной магматической проработкой его западного борта.

В локалях и градиентах гравитационного поля Оленекского выступа отчетливо проявлены ориентированные в северо-западном направлении (см. рис. 5 A, C, 6 C, D) крупные тектонические элементы: Кютингдинский грабен и многочисленные разломы. Разломные зоны отмечены также и упорядоченными магматическими объектами и/или существенной минерализацией, что оказалось возможным проследить лишь в специальных трансформантах магнитного поля (см. рис. 5 D, 6 B).

Поля ΔT_a и Δg на большей части Оленек-Анабарского междуречья отличаются плавными, округлыми формами и значительными (до 100 × 75 км) размерами аномалий, прежде всего свидетельствующими о глубинном положении их источников. Так, большая мощность осадков в расположенных здесь депоцентрах регионального прогиба и в Хастахском грабен-рифте обуславливает величину присущих им отрицательных гравитационных аномалий. Определяющим обстоятельством при истолковании геологической природы магнитного поля Лено-Анабарского прогиба, объясняющим его слабый региональный фон (см. рис. 4 B), является то, что породы осадочного чехла практически немагнитны [19]. Совокупный вклад в выделяемые здесь также малоинтенсивные длинноволновые магнитные аномалии вносят рельеф нижней границы литосферных магнитных источников, вариации состава пород фундамента и рельефа его поверхности. Наиболее яркие амплитудные отклики следует связывать с основными и ультраосновными магматическими внедрениями, локализованными, как правило, в крупных разломных зонах, оконтуривающих рифтогенные прогибы (см. рис. 4 B). Так, через всю западную часть района исследования протягивается полоса наиболее интенсивных, дугообразно вытянутых положительных магнитных аномалий, приуроченных к Уджинскому разлому (восточный борт одноименного рифейского рифта [18]) и четко очерченных своими градиентными зонами. Последние представлены на рис. 5 B и 5 D, где также проявлены и аномалии бортов Хастахского рифта (более ярко, чем на рис. 4 B). Рис. 6 B демонстрирует цепочки линейных магнитных аномалий, протянувшихся вдоль этих аномальных зон. В гравитационном поле наиболее интенсивными локальными аномалиями и градиентами отмечен борт Уждинского рифта (см. рис. 5 A, C, 6 C, D).

Сравнение контуров тектонических линий на рис. 1 с выявленными линеаментами аномальных потенциальных полей (см. рис. 6 B, D) показывает, что материалы проведенного анализа существенно корректируют ранее имеющиеся представления о простирании Уджинского рифта [1]. Характер магнитных и гравитационных аномалий в диапазоне широт 71-71,5° N существенно меняется, и их линии изгибаются с северо-северо-востока на северо-северо-запад. На этом участке рифт пересекает протягивающаяся от Кютингдинского грабена в северо-западном направлении линейная зона интенсивных магматических и трапповых проявлений разных эпох магматической активности (от рифейских до позднеюрских [15]). Эта зона была отчетливо выделена на сложном, интеренференционном фоне аномальных потенциальных полей благодаря проведенным трансформациям (см. рис. 5 C, D, 6 A–D).

Корреляции пространственной картины распределения сейсмичности с аномалеобразующими элементами геологического строения

Заключительный этап анализа состоял в выявлении связи особенностей пространственной картины распределения сейсмичности с элементами геологического строения, отмеченными специфическими характеристиками потенциальных полей.

Наиболее яркой корреляцией, обнаруженной в пределах изучаемой территории, является приуроченность полосы максимальной концентрации сейсмических событий к высокоградиентной зоне гравитационного поля, подчеркивающей Лено-Анабарский краевой шов и СВСНП (см. рис. 5 A). Высокая геодинамическая активность этих региональных структур в целом широко обсуждается (например, [20]). В то же время, проведенный анализ обнаруживает существенные детали корреляционной картины и позволяет сделать предположения о сейсмотектонической приуроченности латерального экстремума сейсмичности вдоль простирания ее пояса. Сопоставление изображений на рис. 4 A, рис. 5 A, C и рис. 6 A, C выявляет связь этого экстремума и резкого «обрыва» линейной гравитационной аномалии, отвечающей Оленекской складчатой зоне. По-видимому, этот «обрыв» вызван сейсмогенной дизъюнктивной структурой, обрезающей пластину надвига Оленекской складчатой зоны на ее границе с Нижне-Ленской впадиной. Помимо этого, область максимальной концентрации эпицентров землетрясений охватывает также и окончание следующей (в северо-восточном направлении) аномальной полосы гравитационного поля. Последняя расположена уже на территории дельты р. Лены и отвечает надвигу СВСНП, который заканчивается так называемым Туматским выступом (по [21]). Юго-восточное продолжение пояса сейсмичности уже в большей мере связано с аномальными полями и структурами СВСНП, хотя эпицентры значимых для этой территории землетрясений ($M > 4{,}5$) находятся и на платформенной части — в пределах восточных окрестностей Хорбусуонского грабен-рифта (см. рис. 4).

Анализ пространственного распределения эпицентров землетрясений относительно особенностей магнитного поля приводит к выводу о том, что большая их часть тяготеет к краевым зонам аномалий положительного значения. Это относится к достаточно интенсивным сейсмическим событиям, упомянутым выше (на восточном, сопряженном с рифтом борту Оленекского выступа), а также к событиям, локализованным на активизированных границах древних рифтов западной части территории изучения. На рис. 4 В эпицентры землетрясений прослеживаются в бортах наиболее крупных магнитных аномалий. Более полно эти связи выявляются в распределении локалей магнитного поля. Так, вышеупомянутые участки экстремального сгущения сейсмических событий, приуроченные к сильным градиентам гравитационного поля (дельта р. Лена и прилегающие области), отвечают краям слабых магнитных аномалий (см. рис. 5 А, 6). Это же относится к событиям, зафиксированным на Оленекском выступе, а также к редким событиям внутри почти асейсмичного ложа Хастахского прогиба (Хастахское землетрясение с $M_w = 4{,}7$ [9]) (см. рис. 4 В, 6 А, В). Связь этих аномалий с магматическими проявлениями дает представление о сейсмотектонической природе землетрясений, связанной, по всей видимости, с активизацией магмоподводящих или магмоконтролирующих разломных зон.

Следует отметить также и появившиеся в процессе проведенного анализа возможности диагностики скрытых разломных зон по результатам корреляции выделяемых линеаментов слабых аномальных полей и распределений эпицентров землетрясений (см. рис. 6). Примером может служить ранее упомянутое Хастахское землетрясение, локализованное в бортах слабых линейных магнитной и гравитационной аномалий на линии северо-западной экстраполяции крупной разломной зоны Оленекского свода (см. рис. 4).

Заключение

Полученные результаты и их интерпретация дают новые сведения о связи между сейсмичностью и потенциальными полями в регионе Лено-Анабарского прогиба. Как было показано, высокая сейсмическая активность главным образом отвечает областям аномальных градиентов гравитационного и магнитного полей. Эти зоны уверенно диагностируют неоднородности геологического строения, значительная часть которых отличается высоким сейсмогенным потенциалом.

При обнаружении и верификации этих корреляционных связей очень важным оказался интегрированный подход с использованием геофизических полей разной природы, а также их многообразных аномальных и статистических характеристик. Эффективность проведения анализа была обеспечена применением современного аналитического комплекса ГИС INTEGRO. Так, применение специальных методов выделения локальных линейных аномалий позволило выявить детали морфологии потенциальных полей, которые можно связать с ранее неизвестными сейсмогенерирующими структурами — разломными зонами северо-западного простирания в наиболее погруженной части Лено-Анабарского прогиба, а также в пределах сейсмически активных участков Лено-Анабарского краевого шва.

Установленные корреляции между распределением сейсмичности и особенностями потенциальных полей служат хорошей предпосылкой дальнейшего проведения геофизического моделирования для выяснения глубинной структурно-тектонической приуроченности очагов землетрясений в Северо-Западной Якутии. Проведение подобного моделирования будет способствовать совершенствованию сейсмического прогноза для территории, где обнаружены стратегически важные источники минеральных ресурсов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственных заданий №№ 075-00682-24, 224020500335-2) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Благодарсности: *Авторы благодарны разработчикам ГИС INTEGRO за возможность ее использования.*

Список источников

1. *Khudoley A.K., Frolov S.V., Akhmanov G.G., Bakay E.A., Drachev S.S., Egorov A.Yu., Ershova V.B., Korobova N.I., Shevchuk N.S., Rogov M.A.* Anabar–Lena Composite Tectono-Sedimentary Element, northern East Siberia [Электронный ресурс] // Sedimentary Successions of the Arctic Geological Region and their Hydrocarbon Prospectivity / ed. S.S. Drachev, H. Brekke, E. Henriksen, T. Moore. – (Geological Society Memoirs. Vol. 57). – London : The Geological Society of London, 2024. – 19 p. – Режим доступа: https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/M57-2021-29 (дата обращения 10.06.2024 г.). DOI: 10.1144/M57-2021-29.

2. *Cherepanova Y., Artemieva I.M., Thybo H., Chemia Z.* Crustal structure of the Siberian Craton and the West Siberian Basin: an appraisal of existing data // Tectonophysics. – 2013. – Vol. 609. – P. 154–183. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.004.

3. *Тектоника*, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Отв. ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. – М : Наука/Интерпериодика, 2001. – 571 с.

4. *Козьмин Б.М., Шибаев С.В., Петров А.Ф., Тимиршин К.В.* Лено-Таймырская аномалия сейсмоактивной среды на шельфе моря Лаптевых // Наука и образование. – 2014. – № 2. – С. 105–110.

5. *Аветисов Г.П.* Некоторые вопросы динамики литосферы моря Лаптевых // Физика Земли. – 1993. – № 5. – С. 28–38.

6. *Ekström G., Nettles M.* Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project (Электронный ресурс) / Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University. –2018. – Режим доступа: http://www.globalcmt.org (дата обращения: 10.06.2024 г.).

7. *Fujita K., Koz'min B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., McLean M.S., Imaev V.S.* Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // Stephan Mueller Special Publication Series. – 2009. – Vol. 4. – pp. 117–145. DOI: 10.5194/smsps-4-117-2009.

8. *Cook D.B., Fujita K., McMullen C.A.* Present-day plate interactions in Northeast Asia: North American, Eurasian, and Okhotsk plates // Journal of Geodynamics. – 1986. – Vol. 6. – pp. 33–51. DOI: 10.1016/0264-3707(86)90031-1.

9. *Seredkina A.I., Melnikova V.I.* New data on earthquake focal mechanisms in the Laptev Sea region of the Arctic-Asian seismic belt // Journal of Seismology. – 2018. – Vol. 22. – № 5. – pp. 1211–1224. DOI: 10.1007/s10950-018-9762-9.

10. *Козьмин Б.М.* Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. – М. : Наука, 1984. – 125 с.

11. *Filippova A.I., Melnikova V.I.* Crustal stresses in the East Arctic region from new data on earthquake focal mechanisms // Tectonics. – 2023. – Vol. 42. – Iss. 9. – e2022TC007338. DOI: 10.1029/2022TC007338.

12. *Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. – М. : АН СССР, 1960. – С. 75–114.

13. *Черемисина Е.Н., Финкельштейн М.Я., Деев К.В., Большаков Е.М.* ГИС INTEGRO. Состояние и перспективы развития в условиях импортозамещения // Геология нефти и газа. – 2021. – № 3. – С. 31–40. DOI: 3. 10.31087/0016-7894-2021-3-31-40.

14. *Лемешко Б.Ю., Танасейчук А.В.* Исследование распределения оценок коэффициента корреляции в зависимости от истинного значения корреляции // Актуальные проблемы электронного приборостроения. АПЭП-2006. Материалы VIII Международной конференции. – Т. 6. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – С. 91–94.

15. *Государственная* геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилюйская. Лист R-51 — Джарджан. Объяснительная записка / Л.И. Сметанникова, В.С. Гриненко, Ю.А. Маланин, А.В. Прокопьев и др. − СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. – 397 с.

16. *Создание* цифровой карты гравитационного поля территории Республики Саха (Якутия) масштаба 1:500 000, 1:1 000 000, 1:1 500 000, 1:2 500 000, 1:5 000 000 по состоянию изученности на 01.01.2005 г. в 2002–2004 гг. : геологический отчет / Якутская ПСЭ; О.Г. Бузикова, Г.А. Лисник, Н.П. Ковалева, и др. – Якутск, 2004. – Инв. № Росгеолфонда 485903.

17. *Создание* цифровой карты аномального магнитного поля (ΔT_a) территории Республики Саха (Якутия) масштаба 1:500 000, 1:1 500 000, 1:5 000 000 по состоянию изученности на 01.01.2005 г. в 2003–2006 гг. : объяснительная записка // Государственная гравиметрическая съемка масштаба 1:200 000 на Арга-Салинской площади РС(Я) R-49-XXXIII, XXXIV; Q-49-III,IV объем 15,8 тыс. кв. км. в 2005–2008 гг. : геологический отчет / Якутская ПСЭ; Лисник Г.А. – Якутск, 2006. – Инв. № Росгеолфонда 492692.

18. *Государственная* геологическая карта Российской федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилюйская. Лист R-50 — Саскылах. Объяснительная записка / М.В. Герасимова, В.Г. Черенков, Н.С. Посошкова, В.А. Истомин, Г.В. Чесноков, Е.Ю. Сидоренко, И.В. Чернова, М.Ю. Сучилина. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2022. – 387 с.

19. *Афанасенков А.П., Никишин А.М., Унгер А.В., Бордунов С.И., Луговая О.В., Чикишев А.А., Яковишина Е.В.* Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника. – 2016. – № 2. – С. 23–42. DOI: 10.7868/S0016853X16020028.

20. *Имаева Л.П.* Сейсмотектоническая активизация новейших структур восточного сектора Сибирского кратона. – Пенза : Социосфера, 2022. – 371 с.

21. *Схема* тектонического районирования России. Масштаб 1:5000000 / ИМГРЭ, ГЕОКАРТ; Сост. Г.С. Гусев, К.Л. Волочкович, Н.В. Межеловский, М.В. Минц, П.С. Ревякин. – Москва : МПР РФ; ИМГРЭ, 2001. – 6 л.

References

1. *Khudoley A.K., Frolov S.V., Akhmanov G.G., Bakai E.A., Drachev S.S., Egorov A.Y., Ershova V.B., Korobova N.I., Shevchuk N.S., Rogov M.A.* Anabar-Len composite tectono-sedimentary element, northern Eastern Siberia. In: Sedimentary Successions of the Arctic Geological Region and their Hydrocarbon Prospectivity. Drachev S.S., Brekke H., Henriksen E., Moore T., eds. (Geological Society Memoirs. Vol. 57). London: The Geological Society of London; 2024. 19 p. Available at: https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/M57-2021-29 (accessed 10.06.2024). DOI: 10.1144/M57-2021-29.

2. *Cherepanova Y., Artemyeva I.M., Thibault H., Chemiya Z.* Crustal structure of the Siberian Craton and the West Siberian Basin: evaluation of existing data. *Tectonophysics*. 2013;609:154–183. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.05.004.

3. *Parfenov L.M., Kuz’min M.I. (eds.)* Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). Moscow: Nauka/Interperiodica; 2001. 571 p.

4. *Koz'min B.M., Shibaev S.V., Petrov A.F., Timirshin K.V.* Leno-Taimyrskaya anomaliya seismoaktivnoi sredy na shel'fe morya Laptevykh [Lena-Taimyr anomaly of the seismic active environment on the shelf of the Laptev Sea]. *Nauka i obrazovanie.* 2014;(2):105–109.

5. *Avetisov G.P.* Some problems of lithospheric dynamics of the Laptev sea. *Fizika Zemli*. 1993;(5):28–38.

6. *Ekström G., Nettles M.* Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project. 2018. Available at: http://www.globalcmt.org (accessed 10.06.2024).

7. *Fujita K., Koz’min B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., McLean M.S., Imaev V.S.* Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia. *Stephan Mueller Special Publication Series*. 2009;4:117–145. DOI: 10.5194/smsps-4-117-2009.

8. *Cook D.B., Fujita K., McMullen C.A.* Modern plate interactions in North-East Asia: North American, Eurasian and Okhotsk plates. *Journal of Geodynamics*. 1986;6:33–51. DOI: 10.1016/0264-3707(86)90031-1.

9. *Seredkina A.I., Melnikova V.I.* New data on the mechanisms of earthquake sources in the Laptev Sea region of the Arctic-Asian seismic belt. *Journal of Seismology.* 2018;22(5):1211–1224. DOI: 10.1007/s10950-018-9762-9.

10. *Koz'min B.M.* Seismicheskie poyasa Yakutii i mekhanizmy ochagov ikh zemletryasenii. [Seismic belts of Yakutia and mechanisms of their earthquake sources]. Moscow: Nauka; 1984. 125 p.

11. *Filippova A.I., Melnikova V.I.* Crustal stresses in the East Arctic region from new data on earthquake source mechanisms. *Tectonics*. 2023;42(9):e2022TC007338. DOI:10.1029/2022TC007338.

12. *Rautian T.G.* Ehnergiya zemletryasenii [Earthquake Energy]. In: Metody detal'nogo izucheniya seismichnosti. Moscow: AN SSSR; 1960. pp. 75–114.

13. *Cheremisina E.N., Finkel'shtein M.Ya., Deev K.V., Bol'shakov E.M.* GIS INTEGRO. Status and prospects for development in the context of import substitution. *Russian Oil and Gas Geology.* 2021;(3):31–40. DOI: 3. 10.31087/0016-7894-2021-3-31-40.

14. *Lemeshko B.Yu., Tanaseichuk A.V.* Issledovanie raspredeleniya otsenok koehffitsienta korrelyatsii v zavisimosti ot istinnogo znacheniya korrelyatsii [Investigation of the correlation coefficient estimation distribution depending on the true correlation value]. In: Aktual'nye problemy ehlektronnogo priborostroeniya. APEHP-2006. Materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii. Vol. 6. Novosibirsk: NGTU; 2006. pp. 91–94.

15. *Smetannikova L.I., Grinenko V.S., Malanin Yu. V., Prokop'ev A. V. et al.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Anabaro-Vilyuiskaya. List R-51 — Dzhardzhan. Ob"yasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Anabaro-Vilyuyskaya Series. Sheet R-51 — Dzhardzhan. Explanatory note]. St Petersburg: VSEGEI; 2013. 397 p.

16. *Buzikova O.G., Lisnik G.A., Kovaleva N.P. et al.* Sozdanie tsifrovoi karty gravitatsionnogo polya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) masshtaba 1:500000, 1:1000000, 1:1500000, 1:2500000, 1:5000000 po sostoyaniyu izuchennosti na 01.01.2005 g. v 2002-2004 gg. : geologicheskii otchet [Creation of a digital map of the gravity field of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) at the scales of 1:500000, 1:1000000, 1:1500000, 1:2500000, 1:5000000 as of 1.01.2005, in 2002–2004: geological report]. Yakutsk, 2004. Rosgeolfond inv. № 485903.

17. *Lisnik G.A.* Sozdanie tsifrovoi karty anomal'nogo magnitnogo polya (ΔT)a territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) masshtaba 1:500000, 1:1500000, 1:5000000 po sostoyaniyu izuchennosti na 01. 01.2005 g. v 2003–2006gg. : ob"yasnitel'naya zapiska [Creation of a digital map of the anomalous magnetic field (ΔT)a of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) on a scale of 1:500 000, 1:1 500 000, 1:5 000 000 as of 01.01.2005 in 2003–2006 : explanatory letter]. In: Gosudarstvennaya gravimetricheskaya s"emka masshtaba 1:200000 na Arga – Salinskoi ploshchadi RS(YA) R-49-XXXIII, XXXIV; Q-49-III,IV ob"em 15.8 tys. kv. km. v 2005-2008 gg. : geologicheskii otchet. Yakutsk, 2006. Rosgeolfond inv. № 492692.

18. *Gerasimova M. V., Cherenkov V.G., Pososhkova N.S., Istomin V.A., Chesnokov G.V., Sidorenko E.Y.,Chernova I.V., Suchilina M.Y.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Anabaro-Vilyuiskaya. List R-50 — Saskylakh. Ob"yasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Anabaro-Vilyuyskaya Series. Sheet R-50 — Saskylakh. Explanatory note]. St. Petersburg: VSEGEI; 2022. 387 p.

19. *Afanasenkov A.P., Unger A.V., Lugovaya O.V., Chikishev A.A., Nikishin A.M., Bordunov S.I., Yakovishina E.V.* The tectonics and stages of the geological history of the Yenisei–Khatanga basin and the conjugate Taimyr orogen. *Geotectonics*. 2016;50(2):161–178. DOI: 10.1134/S0016852116020023.

20. *Imaeva L.P.* Seismotektonicheskaya aktivizatsiya noveishikh struktur vostochnogo sektora Sibirskogo kratona [Seismotectonic activation of the newest structures of the eastern sector of the Siberian craton]. Penza: Sotsiosfera; 2022. 370 p.

21. *Gusev G.S., Volochkovich K.L., Mezhelovskii N.V., Mints M.V., Revyakin P.S.* Skhema tektonicheskogo raionirovaniya Rossii. Masshtab 1:5000000 [Scheme of Tectonic Zoning of Russia. Scale 1:5000000]. Moscow; MPR RF; IMGREH, 2001. 6 p.

Статья поступила в редакцию 27.03.2024 г., одобрена после рецензирования 25.04.2024 г., принята к публикации 20.06.2024 г.
The article was submitted 27.03.2023; approved after reviewing 25.04.2024; accepted for publication 20.06.2024.

Информация об авторах

Куляндина Альбина Семеновна
Аспирант
Геологоразведочный факультет
Северо-Восточный федеральный университет
имени М.К. Аммосова
677000 Якутск, ул. Белинского, д. 58
Ведущий инженер-геофизик
Якутский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба» РАН
677007 Якутск, пр. Ленина, д. 39
e-mail: albineku28@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4330-033X
SPIN-код: 6283-7440
AuthorID: 1130268

Соколова Елена Юрьевна
Кандидат физико-математических наук
Ведущий научный сотрудник
Отделение Геоинформатики
ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский
геологический нефтяной институт»
117105 Москва, Варшавское ш., д. 8
Ведущий научный сотрудник
ФГБУН Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН
123242 Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1
e-mail: sokol_l@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5788-6944
SPIN-код: 9848-2055
AuthorID: 61429

Филиппова Алена Игоревна
Кандидат физико-математических наук
Старший научный сотрудник
ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
108840 Москва, Троицк, Калужское шоссе, д. 4
e-mail: aleirk@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9793-1685
Scopus AuthorID: 57224828098
ResearcherID: L-6958-2018
SPIN-код: 9924-5029
AuthorID: 1024411

Information about authors

Albina S. Kulyandina
Postgraduate Student
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University
Geological Exploration Faculty
58, Belinsky str., Yakutsk, 677000, Russia
Leading Engineer-geophysicist
Yakutsk Branch of the Geophysical Survey RAS
39, Lenin Ave., Yakutsk, 677007, Russia
e-mail: albineku28@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4330-033X
SPIN-код: 6283-7440
AuthorID: 1130268

Elena Yu. Sokolova
Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Leading Researcher
Department of Geoinformatics
All-Russian Research Geological Petroleum Institute
8 Varshavskoye sh., Moscow, 117105, Russia
Leading Researcher
Schmidt Institute of Physics of the Earth
of the Russian Academy of Sciences
build. 1, 10, Bolshaya Gruzinskaya str., Moscow, 123242, Russia
e-mail: sokol_l@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5788-6944
SPIN-код: 9848-2055
AuthorID: 61429

Alena I. Filippova
Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Senior Researcher
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and
Radio Waves Propagation of the Russian Academy of Sciences
4, Kaluzhskoye sh., Moscow, Troitsk, 108840, Russia
e-mail: aleirk@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9793-1685
Scopus Author ID: 57224828098
ResearcherID: L-6958-2018
SPIN-код: 9924-5029
AuthorID: 1024411