

УДК 551.24:550.83 (571.511)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-3-13-27

НОВЕЙШИЕ СТРУКТУРЫ ВОСТОЧНОГО ТАЙМЫРА И ИХ СВЯЗЬ С ГРАВИТАЦИОННЫМИ АНОМАЛИЯМИ И СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

Владимир Сергеевич Захаров^{1✉}, Галина Владимировна Брянцева²,
Наталья Игоревна Косевич³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; zakharov@geol.msu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-8888-4239>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; bryan.bryan@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nkosevich@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6244-3307>

Аннотация. Изучение новейших структур востока Таймырского полуострова, выраженных в рельефе, проводилось с помощью структурно-геоморфологического метода, позволяющего выявлять новейшие деформации, которые сопоставлялись с особенностями гравитационного поля и его трансформантов. Показано соответствие между гравитационными аномалиями и величиной конэрозионных поднятий, а также установлена приуроченность выделенных блоков и их границ к особенностям поля трансформантов гравитационных аномалий. Зоны сейсмичности в пределах Восточного Таймыра и сопредельных территорий тяготеют к разломам, активным в кайнозойский период, а также к вытянутой зоне контрастных значений гравитационных аномалий и их трансформантов северо-западного простираения.

Ключевые слова: геоморфология, неотектоника, Таймырский полуостров, гравитационные аномалии, сейсмичность

Для цитирования: Захаров В.С., Брянцева Г.В., Косевич Н.И. Новейшие структуры Восточного Таймыра и их связь с гравитационными аномалиями и сейсмичностью // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 3. С. 13–27.

NEOTECTONIC STRUCTURES OF THE EASTERN TAIMYR AND THEIR RELATIONSHIP WITH GRAVITATIONAL ANOMALIES AND SEISMICITY

Vladimir S. Zakharov^{1✉}, Galina V. Bryantseva², Natalya I. Kosevich³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; zakharov@geol.msu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-8888-4239>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; bryan.bryan@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nkosevich@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6244-3307>

Abstract. The study of the newest structures of the east of the Taimyr Peninsula, expressed in relief, was carried out using the structural and geomorphological method, which allows to identify the latest deformations, which were compared with the features of the gravitational field and its transformants. A good correspondence between gravitational anomalies and the magnitude of erosion uplifts is shown, and the confinement of the selected blocks and their boundaries to the peculiarities of the transformant field is established. The zones of seismicity within the Eastern Taimyr and adjacent territories tend to faults active in the Cenozoic period, as well as to an elongated zone of contrasting values of gravitational anomalies and their transformants of the strike zone.

Keywords: geomorphology, neotectonics, Taimyr Peninsula, gravitational anomalies, seismicity

For citation: Zakharov V.S., Bryantseva G.V., Kosevich N.I. Neotectonic structures of the Eastern Taimyr and their relationship with gravitational anomalies and seismicity. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 3: 13–27. (In Russ.).

Введение. Район исследования расположен в пределах сочленения крупных тектонических структур — Таймырской складчато-надвиговой системы и северной части древней Восточно-Сибирской платформы. Новейший этап развития начался по разным данным в среднем–позднем эоцене [Афанасенков и др., 2016] или в олигоцене [Мусатов, 1996]. Несмотря на то, что складчатые сооружения Таймыра были сформированы к концу триаса, движения по надвигам наблюдаются и в настоящее время [Верниковский, 1996].

В связи с интенсивным освоением Арктики появилась необходимость детальных неотектонических исследований этого района. Известной работой на эту тему является статья Е.Е. Мусатова [Мусатов, 1996], основанная на сейсмологических и геологических материалах. В результате длительной тектонической истории данного региона строение приповерхностной части земной коры претерпело значительные изменения, что нашло отражение в сложном и разнообразном рельефе. Структурно-геоморфологический метод, предло-

женный Н.П. Костенко [Костенко, 1999], позволяет определить неотектонические деформации, а также выделить основные системы поднятий и впадин, разграничивающие их разрывы и зоны трещиноватости с помощью анализа рельефа. Основываясь на этой методике, для Таймырского полуострова авторами были составлены структурно-геоморфологические схемы различного масштаба [Брянцева и др., 2018; 2021]. Наибольший интерес вызывают новейшие деформации Восточного Таймыра, поскольку в результате этих исследований было выявлено нарастание интенсивности неотектонических процессов на Таймыре в северо-восточном направлении, что обусловлено приближением к зоне спрединга хребта Гаккеля Северного Ледовитого океана [Брянцева и др., 2021].

Регион характеризуется заметной сейсмической активностью. Согласно данным, приведенным в работе [Козьмин и др., 2014], современное сочленение Западно-Лаптевоморского бассейна и Сибирского бассейна, к которому примыкает район нашего исследования, рассматривается как сейсмическая зона с магнитудой 6 и выше. Эпицентры землетрясений здесь образуют линейную зону, от Таймыра до края Прончищева, расположенного между реками Анабар и Оленек.

В последние годы на Таймыре и в прилегающих районах активно проводятся работы по изучению территории геофизическими методами (гравитационные и магнитные аномалии, магнитотеллурические исследования, сейсмопрофилирование), что связано с анализом перспектив нефтегазоносности региона, особенно Енисей-Хатанского прогиба. Появилось несколько работ, обобщающих и анализирующих геофизические данные для региона Таймыра. Так, в статье [Афанасенков и др., 2017] проводится комплексная интерпретация гравитационного и магнитного полей северного обрамления Восточно-Сибирской платформы (включая Таймыр) с опорой на новейшие геолого-геофизические данные. На основании этого создана формализованная объемная реконструкция Енисей-Хатангской региональной структуры. В работах [Кушнир, 2018] используя данные сейсморазведочных и электро-разведочных профилей проведен анализ строения континентальной литосферы Таймыра до глубин 50–60 км. В нижних слоях земной коры выявлены контрастные аномалии, которые свидетельствуют об обширных изменениях плотности и электропроводности. В результате в указанных работах выявляется взаимосвязь крупнейших поднятий и прогибов с процессами разуплотнения и уплотнения на уровне подошвы коры, а также знакопеременный характер вертикальных движений как результат комплексного воздействия коллизионного сжатия и глубинных (мантийных) факторов, обусловивших изменения плотности в основании земной коры. В работах также большое внимание уделено районам, примыкающим к Енисей-Хатангскому прогибу.

При этом более северные и северо-восточные районы п-ова Таймыр, практически лишенные осадочного чехла, в публикуемых работах, как правило, не включались в детальные исследования и интерпретацию. Кроме того, практически отсутствуют работы, в которых подробно рассматривается связь тектонических и неотектонических структур с особенностями геофизических полей и других геофизических данных.

Таким образом, сопоставление результатов неотектонических и геофизических исследований представляется актуальной задачей для данного района.

Целью данной работы является установление новейших структур Восточного Таймыра на основании структурно-геоморфологического метода и выявление связи этих структур с особенностями гравитационного поля и сейсмичностью.

Исходные данные и методика работы. Анализ рельефа для выявления пространственного положения новейших деформаций проводится в плане и в вертикальных сечениях. Для этого используются как прямые, так и косвенные геоморфологические признаки: спрямленные участки водотоков и других элементов рельефа, их линейное расположение и т.д. Для определения динамической характеристики разрывов строятся геоморфологические профили. Анализ деформации зоны водораздельной денудации, перекося приразломовых долин, изменение высоты цикловых ступеней на разных бортах долины, разновысотность блоков, резкое изменение крутизны склонов позволяет выявить активные в настоящее время разрывные нарушения. Топокарты в сочетании с геологическими данными дают также возможность определить суммарные поднятия неоструктур в течение конэрозионной стадии развития.

На исследуемую территорию была составлена структурно-геоморфологическая схема (СГС) с характеристикой горизонтального расчленения рельефа и с учетом суммарных поднятий, а также профили, по которым проводился анализ вертикального сечения. Для работы использовались топографические карты масштаба 1:1 000 000 и данные цифровой модели рельефа GMTED2010 (рис. 1) с пространственным разрешением около 250 м (7,5 угловых секунд) [Danielson, et al., 2011], а также геологические и тектонические материалы. Тематическое и пространственное сопоставление новейших структур, выявленных авторами структурно-геоморфологическим методом и опубликованных материалов предшественников проводился на базе созданного ГИС-проекта, что позволило комплексно проанализировать весь собранный материал и получить результирующие карты.

Выделенные новейшие структуры сопоставлялись (как в плане, так и в вертикальных сечениях) с аномалиями силы тяжести по модели WGM2012 с разрешением 2» (в свободном воздухе Δg_{fa} и в редукции Буге Δg_B с плотностью коры 2,67 г/см³),

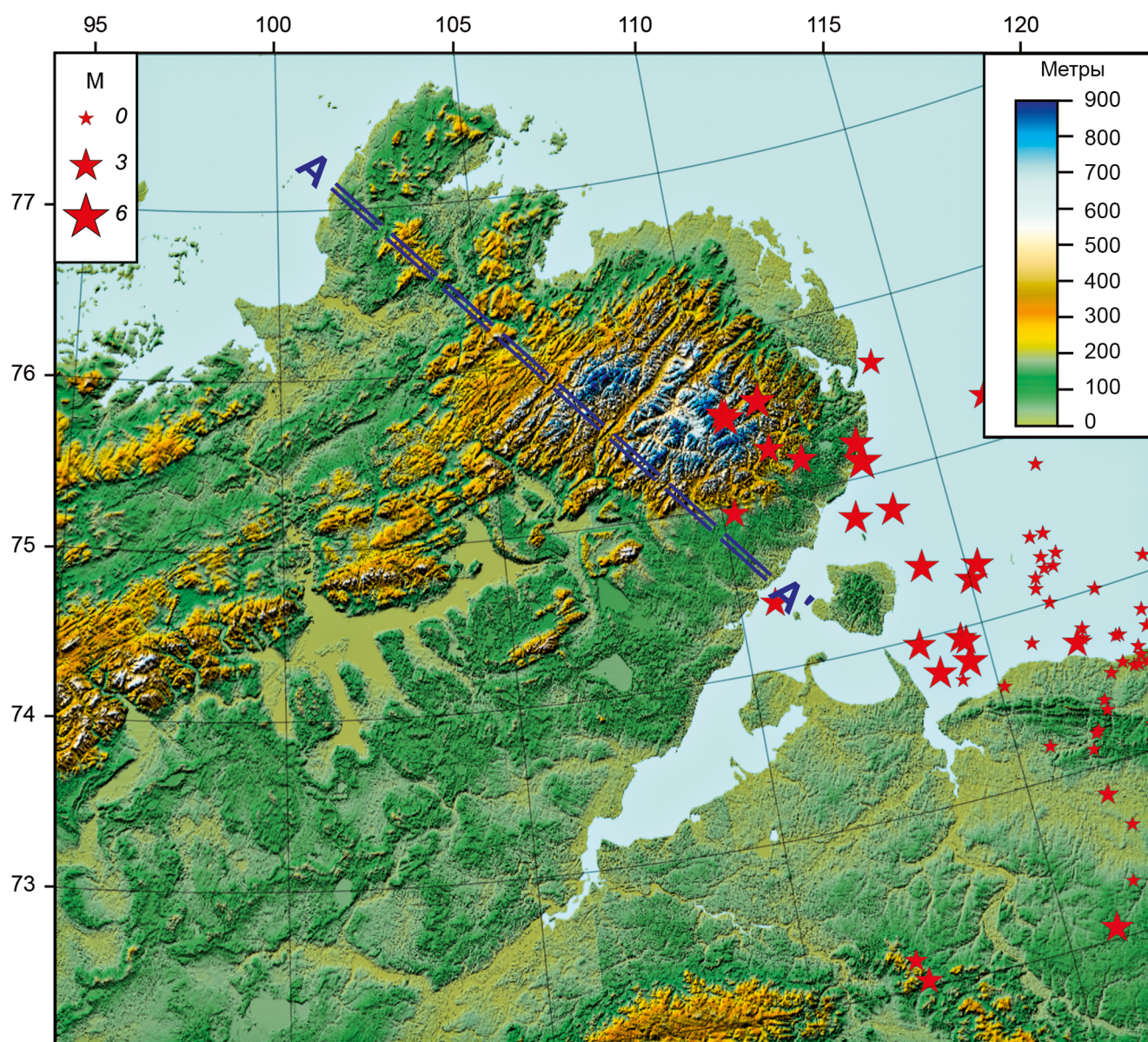


Рис. 1. Рельеф района исследования на основе цифровой модели GMTED2010 и эпицентры землетрясений по данным ISC за 1922–2023 гг. (звездочки). AA' — положение линии профиля для рис. 5

построенных по данным Международного гравиметрического бюро (Bureau Gravimetrique International, BGI [Bonvalot, et al., 2012]). Предварительно было проведено сглаживание в скользящем окне по 7 точкам для подавления помех, связанных со случайными погрешностями и мелкомасштабными неоднородностями. Анализировались также трансформанты гравитационных аномалий Буге: вертикальный (W_{zz}) и горизонтальный (W_{xz}) градиенты, вторая вертикальная производная (W_{zzz}), а также компонента, полученная в результате применения фильтра Баттерворта (амплитудно-частотная характеристика которого максимально гладкая во всем диапазоне полосы пропускания) с частотой среза, отвечающей 30 и 30–100 км.

В случае изостазии обычно характер вариаций Δg_B отражает (в отрицательной корреляции) форму границы Мохоровичича, т.е. мощность земной коры.

По региональным гравиметрическим аномалиям типа гравитационной ступени выделяют глубинные разломы с вертикальными перемещениями соседних блоков. Вычисление высших производных силы тяжести помогает выявить локальные аномалии. Вертикальный градиент поля, как функция плотности, в большей степени реагирует на верхнюю приповерхностную часть зоны динамического влияния разлома. Высшие вертикальные производные силы тяжести обладают большей разрешающей способностью по сравнению с исходными данными для аномалий, вызванных относительно неглубоко залегающими возмущающими телами.

Кроме гравитационных аномалий с выделенными структурами сопоставлялась также сейсмичность по каталогу ISC [International..., 2023] (рис. 1), для выявления активных в настоящее время разломов, а также данные по мощности коры согласно модели

ArcCRUST, которая разработана для высокой Арктики и циркумарктических регионов [Lebedeva-Ivanova, et al., 2019].

Новейшие структуры Восточного Таймыра.

В результате анализа рельефа Восточного Таймыра на структурно-геоморфологической схеме выделены структуры первого порядка: Северо-Сибирская (I) и Притаймырская (IV) равнины, Быррангское (II) и Северо-Таймырское (III) горные сооружения (рис. 2).

Северо-Сибирская равнина расположена в пределах крупных тектонических структур: Енисей-Хатангского и Лено-Анабарского региональных прогибов, разделенных Анабаро-Хатангской седловиной [Афанасенков и др., 2018], которые отделяют Таймырскую складчатую область от Восточно-Сибирской платформы. Северо-Сибирская равнина сложена карбонатными и терригенными породами верхнепалеозойско-мезозойского возраста, перекрытыми кайнозойскими отложениями [Глаголев и др., 1994]. В новейшей структуре можно выделить Киряк-Тасские хребты-поднятия (I_1), Северо-Хатангскую (I_2), Хатангскую (I_3) и Южно-Хатангскую (I_4) впадины.

Киряк-Тасские хребты располагаются на северном борту Енисей-Хатангского прогиба, ограничиваясь с юга Киряк-Тасским (Киряк-Тасско-Цветковским) разломом, а на севере граница с Быррангским горным сооружением проходит по разлому северо-восточного простирания. Это наиболее высокая часть Северо-Сибирской равнины, суммарные конэрозионные поднятия достигают 500–600 м. Внутренний (северный) борт Енисей-Хатангского прогиба, на границе с Таймырским складчатым сооружением имеет сложное блоковое строение [Глаголев и др., 1994] и, по-видимому, был вовлечен в поднятие в период воздымания Быррангского горного сооружения по разломам. Киряк-Тасское горстообразное поднятие сложено морскими терригенными комплексами, позднекаменноугольно-пермского и триасового возраста. По косвенным геоморфологическим признакам можно выделить несколько разрывных нарушений, имеющих северо-западное простирание, которые в настоящее время разрабатываются реками.

Северо-Хатангская впадина является наиболее низкой частью Северо-Сибирской равнины, которая частично заполнена водами Хатангского залива. Суммарные поднятия редко превышают 100 м. На севере она граничит с Киряк-Тасским хребтами-поднятиями, а с юга ограничена Нордвикским и Терпейским разломами. С юрского времени в Енисей-Хатангском прогибе, в пределах которого выделяется Северо-Хатангская впадина, начинают накапливаться терригенные отложения мезозойского и кайнозойского возраста мощностью в осевой части прогиба от 10–12 км [Глаголев и др., 1994], а по некоторым данным до 14 км [Объяснительная..., 1998]. Данная территория испытывает

слабые тектонические движения, характеризующиеся устойчивым опусканием, на фоне которого фиксируются локальные поднятия. В бухте Нордвик, заливе Кожевникова и на п-ве Юрюнг-Тумус при бурении выявлены растущие соляные купола [Прокурин и др., 2013].

Хатангская впадина отделяется от Быррангского горного сооружения по разлому, который разрабатывается в настоящее время рекой Верхняя Таймыра и проходит чуть севернее Таймырского озера. Южная граница этой впадины в новейшей структуре совпадает с системой линеаментов северо-восточного простирания, наследующих Центрально-Таймырский разлом. Однако большая часть выделенных по геоморфологическим признакам линеаментов, имеют преимущественно северо-западное простирание. В пределах впадины по прямым и косвенным признакам можно выделить многочисленные локальные поднятия с высотами более 200 м, которые осложняют данную структуру. По мнению некоторых исследователей рельеф региона сформирован четвертичными оледенениями и морскими трансгрессиями, а имеющиеся здесь возвышенности являются моренными грядами. Однако формирование локальных поднятий в области погружения можно объяснить активным тектоническим режимом данной территории и сложными неотектоническими движениями. В этом случае, в пределах крупных прогибов, развитие которых компенсируется осадконакоплением, наблюдается одновременное формирование структурных форм разного порядка с разнонаправленным характером движений. При этом могут развиваться локальные поднятия, которые плохо выражены или совсем не выражены в рельефе. Когда их скорость становится больше скорости погружения во впадине, тогда развивающаяся структурная форма переходит от конседиментационного к конденудационному или конэрозионному развитию [Костенко, 1999]. Многочисленные протяженные узкие и контрастные валы были выявлены в пределах Енисей-Хатангского прогиба также и в результате геолого-геофизических исследований [Глаголев и др., 1994; Афанасенков и др., 2018]. Их возникновение объясняется инверсионным характером развития структур осадочного чехла за счет вертикальных напряжений, связанных с уплотнением и разуплотнением земной коры под воздействием поступающего из мантии вещества [Кушнир, 2018]. Балахнинский мегавал, Курынский и Кубалахский валы и другие, более мелкие структуры, определенные в результате геофизических исследований и показанные на Тектонической схеме Таймыра [Кушнир, 2018], частично проявляются в рельефе и картируются при структурно-геоморфологическом анализе в виде локальных поднятий в пределах Северо-Сибирской равнины (см. рис. 2).

Южно-Хатангская впадина расположена в пределах северо-западной части Лено-Анабарского регионального прогиба. С раннепермского времени

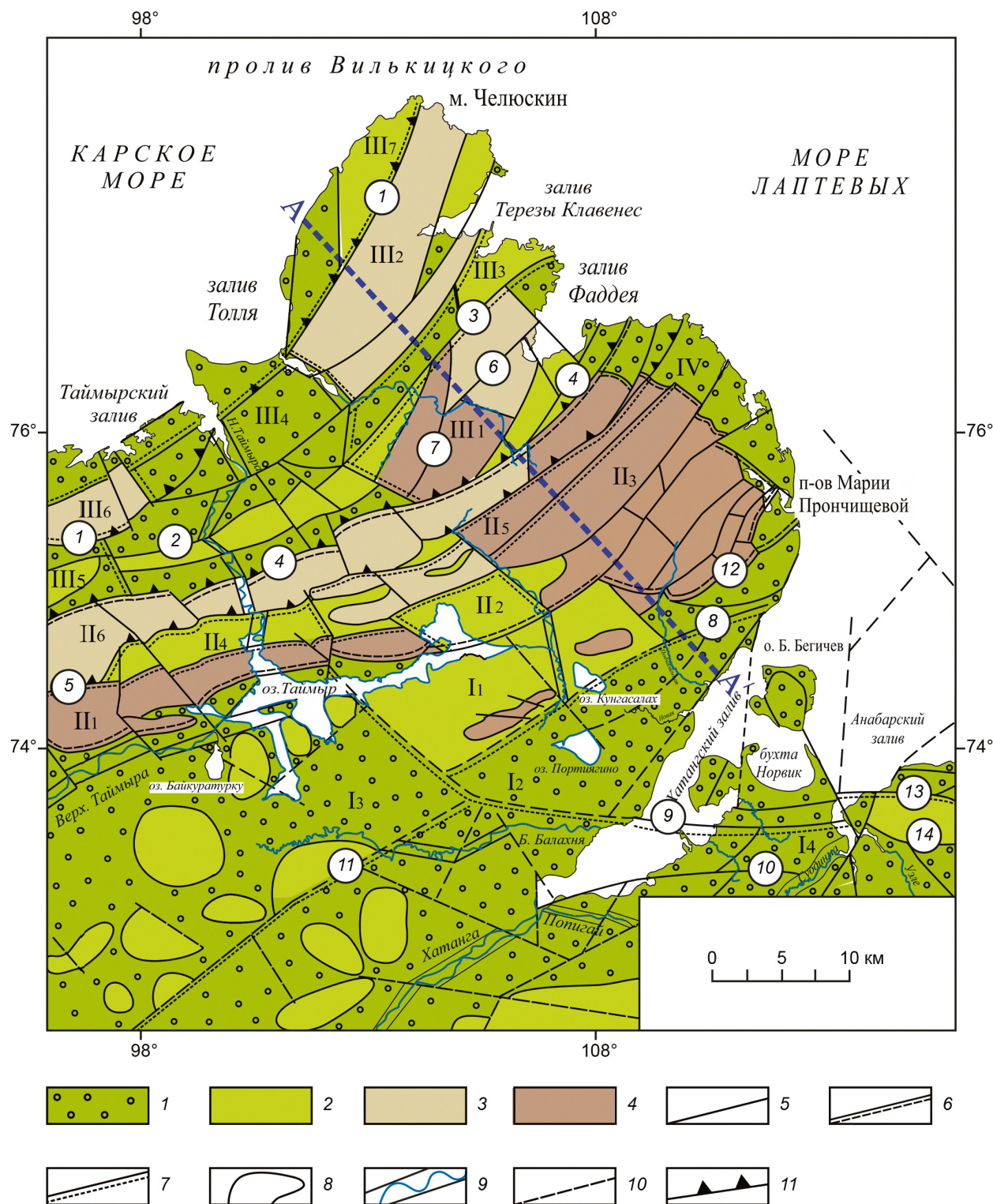


Рис. 2. Структурно-геоморфологическая схема северо-восточной части Таймырского полуострова по [Брянцева и др., 2021], с изменениями (1:1 000 000). Суммарные конэрозионные поднятия, м: 1 — до 200 м, 2 — 201–300, 3 — 301–500, 4 — более 500 м; 5 — разломы, 6 — границы структур первого порядка, 7 — границы структур второго порядка, 8 — отдельные локальные поднятия, 9 — долины рек в поясе меандр, 10 — линейменты, 11 — надвиги, AA' — линия профиля. I — Северо-Сибирская равнина (I₁ — Кирьяк-Тасские хребты-поднятия; впадины: I₂ — Северо-Хатангская, I₃ — Хатангская, I₄ — Южно-Хатангская); II — Быррангское горное сооружение (хребты-поднятия: II₁ — Главные, II₃ — Людэттынэтти, II₅ — Северные, II₆ — Топографические; впадины: II₂ — Ямубайкура, II₄ — Таймырская); III — Северо-Таймырское горное сооружение (хребты-поднятия: III₁ — Фадеевские, III₂ — Лодочникова, III₆ — Коломейцевские; впадины: III₃ — Симса, III₄ — Нижнетаймырская, III₅ — Шренковская, III₇ — Прибрежная низменность); IV — Притаймырская равнина. Цифры в кружках — разломы: 1 — Главный Таймырский, 2 — Мамонтово-Ярский, 3 — Дорожнинский, 4 — Пясино-Фадеевский, 5 — Пограничный, 6 — Ждановский, 7 — Ленинградско-Гольцовый, 8 — Кирьяк-Тасско-Цветковский, 9 — Нордвикский, 10 — Жданихинско-Суолимский, 11 — Центрально-Таймырский, 12 — Черенохребетнинский, 13 — Терпейский, 14 — Прончищевский

эта территория является областью интенсивного погружения. В этот период накапливаются преимущественно терригенные отложения — песчаники, алевролиты, аргиллиты [Объяснительная..., 1998]. Мощность осадочного чехла, включая юрско-кайнозойские отложения, в осевой части прогиба варьирует от 1,5 до 4 км [Глаголев и др., 1994]. На западе впадины высоты редко превышают 50 м, в центральной части достигают 70–80 м. Закрытая, слабо расчлененная и заболоченная территория затрудняет выявление новейших деформаций. Норд-викский и Жаданихинско-Суолимский разломы плохо выражены в рельефе, и только изменения простирания долин многочисленных небольших рек, текущих в северо-западном направлении при пересечении разломных зон, позволило их выделить. Субмеридиональная долина р. Анабар в ее нижнем течении, скорее всего, является при-разломовой. К востоку от Анабарского залива в юго-восточном направлении суммарные конэрозионные поднятия достигают высоты 200 и более метров, образуя кряж Прончищева. Тектоническая активность на данной территории продолжается и в настоящее время, что выражается в проявлении сейсмической активности.

Быррангское горное сооружение протягивается полосой с юго-запада на северо-восток и в новейшей структуре представлено несколькими хребтами, образующими складчато-сводовое горное сооружение [Брянцева и др., 2021]. На границе Быррангского горного сооружения и Северо-Сибирской равнины располагается Таймырское озеро, вероятно, имеющее тектоническое происхождение. В пределах Быррангского горного сооружения вскрываются в основном терригенные породы ордовикско-каменноугольного возраста с подчиненным значением пермско-триасовых вулканогенных образований. Древние разломы северо-восточного простирания, согласного с общим простиранием горного сооружения, часто имеют взбросово-сбросовую и надвиго-сдвиговую кинематику, развиваются унаследовано и на отдельных участках хорошо выражены в рельефе. Горные хребты разбиты на отдельные блоки многочисленными секущими разрывами северо-западного простирания, имеющими преимущественно взбросо-сдвиговую составляющую [Проскурин и др., 2013].

В пределах Быррангского горного сооружения можно выделить: Главные (Π_1), Людэтытнэтти (Π_3), Северные (Π_5) и Топографические (Π_6) хребты-поднятия; Ямубайкура (Π_2) и Таймырскую (Π_4) впадины. *Хребты-поднятия Главные и Людэтытнэтти* расположены на юге Быррангского горного сооружения. Они постепенно расширяются и повышаются в северо-восточном направлении. Суммарные конэрозионные поднятия меняются от 500 до 800 м. В пределах Быррангского горного сооружения кроме узких межгрядовых понижений, разделяющих хребты, в новейшей структуре выделяются

две крупные впадины — *Ямубайкура*, отделяющая хребты Людэтытнэтти от Главных, и *Таймырская*, протягивающаяся практически субширотно между Главным и Топографическим хребтами. Эти грабенообразные впадины выполнены породами мелового возраста и ограничены разломами северо-западного простирания. Суммарные конэрозионные поднятия здесь не превышают 300 м. *Северные хребты* протягиваются от Таймырской впадины в северо-восточном направлении. Для них характерны наибольшие высоты в пределах Быррангского горного сооружения, суммарные конэрозионные поднятия здесь достигают 1000 и более метров. *Топографические хребты* расположены на севере Быррангского горного сооружения, образуя высокое предгорье.

Северо-Таймырское горное сооружение расположено к северу от Быррангского и граничит с ним по Пясино-Фаддеевскому надвику. В новейшей структуре в его пределах можно выделить хребты-поднятия Фаддеевские (Π_1), Лодочникова (Π_2), Коломейцевские (Π_6) и впадины Симса (Π_3), Нижнетаймырскую (Π_4), Шренковскую (Π_5), Прибрежную (Π_7).

Фаддеевские хребты-поднятия расположены к западу от залива Фаддеева. Они сложены преимущественно метаморфизованными ниже-среднерифейскими вулканитами основного и среднего состава, терригенными, терригенно-карбонатными и карбонатными породами, в которые внедрены интрузии разного возраста. Эти хребты ограничены системой согласных разрывных нарушений, имеющих северо-восточное простирание и развивающихся унаследовано, а также разбиты на отдельные блоки секущими разломами северо-западного простирания. В новейшей структуре Фаддеевские хребты имеют хорошо выраженное сводовое строение [Брянцева и др., 2021]. *Хребты-поднятия Лодочникова* имеют северо-северо-восточное простирание, постепенно расширяясь к востоку. Суммарные конэрозионные поднятия не превышают 500 м. Северо-западной границей этих хребтов служит Главный Таймырский надвиг. *Впадина Симса* расположена между хребтами Фаддеевскими и Лодочникова. От Фаддеевских хребтов она отделяется по унаследованно развивающемуся Дорожнинскому надвику. Высоты впадины не превышают 200 м. В рельефе хорошо выражена грабенообразная *Нижнетаймырская впадина*, имеющая сложное строение. Ее границами служат разломы, в основном, северо-западного простирания. Главный Таймырский надвиг в пределах впадины плохо выражен в рельефе. *Шренковская впадина* и *Коломейцевские хребты-поднятия* простираются в западной части Таймырского п-ва [Брянцева и др., 2018], а на рассматриваемой территории наблюдаются только небольшие фрагменты этих структур. Их границей служит Главный Таймырский надвиг, который в данном районе хорошо выражен и образует в рельефе уступ. *Прибрежная низменность* сформирована за счет абразионно-

аккумулятивной деятельности моря, и ее высоты не превышают 200 м.

Притаймырская равнина, сложенная кайнозойскими отложениями, сформировалась в результате неоднократных изменений уровня океана, а также оледенений. На ее формирование, по-видимому, оказали влияние дифференцированные движения, связанные с раскрытием Евразийского бассейна Арктического океана.

Анализ гравитационных аномалий. Выделенные новейшие структуры сопоставлялись с гравитационными аномалиями. Общий характер гравитационных аномалий имеет вид чередования зон повышенных и пониженных значений, вытянутых вдоль основных тектонических и структурных элементов восточного Таймыра с ЮЗ на СВ (рис. 3).

Повышенные значения гравитационных аномалий в свободном воздухе Δg_{fa} (рис. 3, а) отмечаются в пределах Быррангского (20–60 мГал) и Северо-Таймырского (порядка 10 мГал) горных сооружений. Наибольшие значения (более 60 мГал) характерны для наиболее поднятой, северо-восточной части гор Бырранга. Также высокие значения до 30 мГал наблюдаются на севере в пределах Прибрежной равнины, протягиваясь полосой вдоль береговой линии. Линейно расположенные максимумы, имеющие северо-восточное простирание и примерно параллельные Хатангской и Южно-Хатангской впадинам (до 35 мГал), располагаются над Центрально-Таймырским и Кирыко-Тасско-Цветковским разломами. Зоны пониженных значений Δg_{fa} (до –70 мГал), также имеющие северо-восточное простирание, примерно параллельное основным структурным элементам, характерны для Хатангской и Южно-Хатангской впадинам и области оз. Таймыр (до –50 мГал). Таким образом, можно отметить, что в целом аномалии в свободном воздухе достаточно хорошо коррелируют с рельефом и достигают своих наибольших значений в области наибольших величин конэрозионных поднятий.

Для анализа глубинных корней выявленных структур целесообразнее использовать аномалии Буге и трансформанты. Рисунок гравитационных аномалий Буге Δg_B (рис. 3, б) в значительной степени соответствует рисунку аномалий в свободном воздухе, отличаясь, однако, в зоне наибольших поднятий на северо-востоке полуострова. При сопоставлении с новейшими структурами Восточного Таймыра устанавливается, что в целом область выделенных поднятий характеризуется относительно пониженными значениями Δg_B : в пределах горных сооружений Бырранга и Северо-Таймырского гравитационные аномалии Буге имеют значения, не превышающие 50–60 мГал, немного повышаясь в районе Нижнетаймырской грабенообразной впадины до 80–90 мГал. На северо-востоке и севере полуострова в прибрежной зоне аномалии повышаются до 100–120 мГал и более, увеличиваясь в области моря Лаптевых, что отражает переход к океанической

коре. В пределах Северо-Сибирской равнины, где общий фон гравитационных аномалий Буге меняется от 40 до 90 мГал, наблюдаются хорошо выраженные максимумы значений до 130 мГал, имеющие северо-восточное простирание, которые разделяют области пониженных значений Δg_B в области Хатангской и Южно-Хатангской впадин (до 40 мГал) и оз. Таймыр (до 60 мГал). Эти максимумы подчеркивают границы некоторых локальных поднятий.

Следует отметить, что для Северо-Сибирской равнины не наблюдается выраженной связи гравитационных аномалий с рельефом. Как аномалии в свободном воздухе, так и аномалии Буге имеют СВ простирание аномалий вдоль Центрально-Таймырского разлома, при этом повышенные значения наблюдаются над разломом, а параллельно ему — пониженные. И как раз к пониженным значениям аномалий приурочены в основном локальные поднятия. Вероятно, это связано с тем, что некоторые из локальных поднятий еще развиваются конденсационно и не выражены в рельефе.

Рисунок всех видов гравитационных аномалий в районе Нижнетаймырской грабенообразной впадины отличается от рисунка в других зонах более спокойным характером. Возможно, это указывает на выраженность в гравитационном поле условий растяжения в этой зоне.

Для более детального изучения приуроченности выявленных неотектонических структур (блоков и их границ) к особенностям гравитационного поля рассмотрим трансформанты гравитационных аномалий. Это, прежде всего, вертикальный (W_{zz}) и горизонтальный (W_{xz}) градиенты аномалий силы тяжести в редукции Буге (рис. 4, а, б). Характер пространственных вариаций горизонтального градиента W_{xz} показывает, что наибольшие его значения, а также наиболее контрастные вариации достаточно точно соответствуют наиболее поднятым структурам Быррангского горного сооружения (рис. 4, а). В то же время вариации вертикального градиента W_{zz} (рис. 4, б) достаточно хорошо (хотя и не в полной мере) соотносятся с границами выделяемых блоков, особенно наиболее поднятых. Так, к разломным структурам, разделяющим блоки, приурочены, как правило, полосы или цепочки зон повышенных значений вертикального градиента. Наиболее выраженная такая полоса соотносится с зоной Центрально-Таймырского и Кирыко-Тасско-Цветковского разломов (хотя и не вполне точно им соответствует). Зоны повышенного вертикального градиента W_{zz} (рис. 4, б) достаточно точно соответствуют зонам наибольшей вариации мощности коры (см. рис. 6), что также является проявлением связи аномалий Буге со структурой коры. Анализ пространственного распределения второй вертикальной производной W_{zzz} показал, что она имеет выраженный мозаичный знакопеременный характер, причем наиболее контрастные области соответствуют наибольшим поднятиям. Сходный

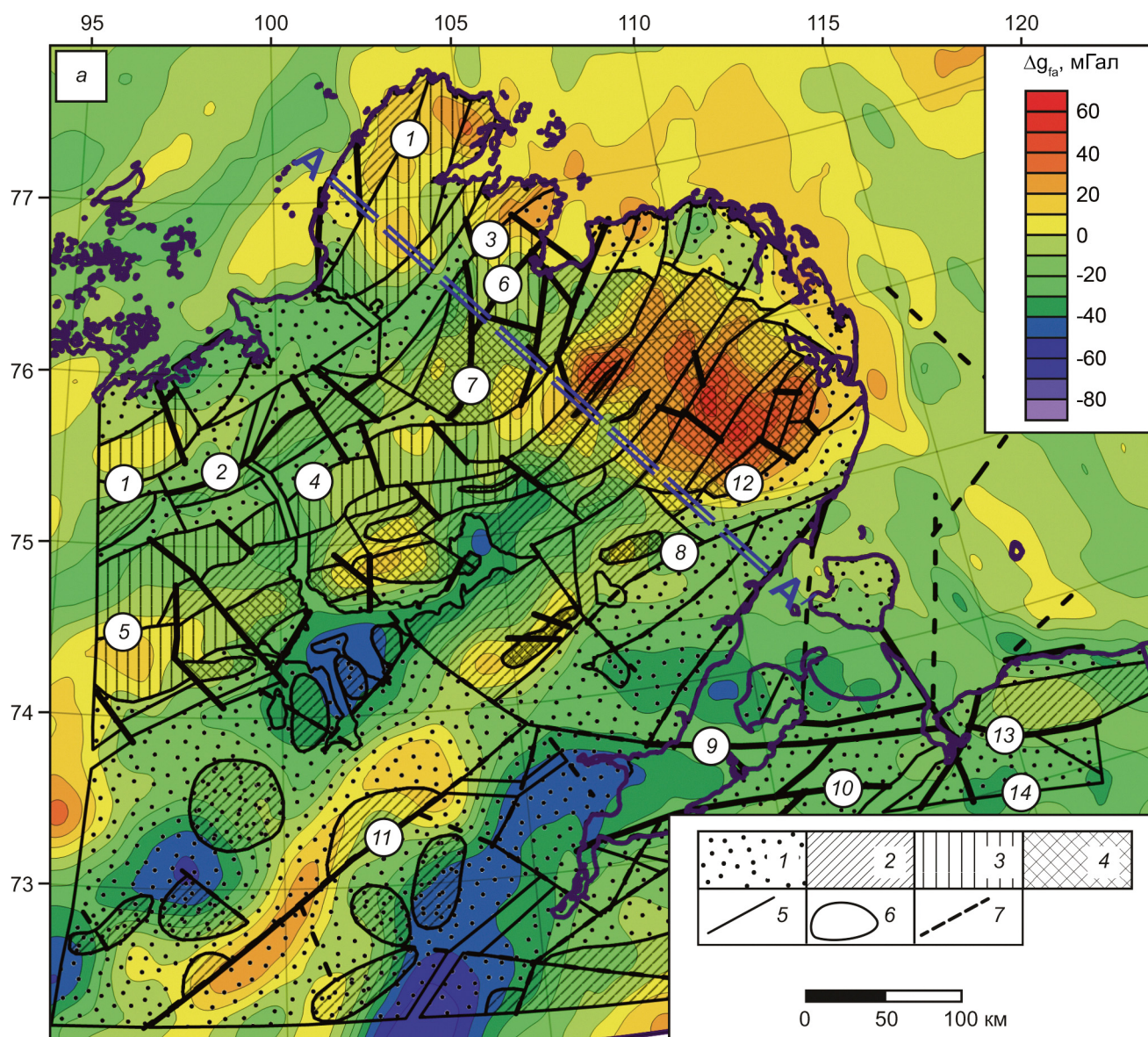
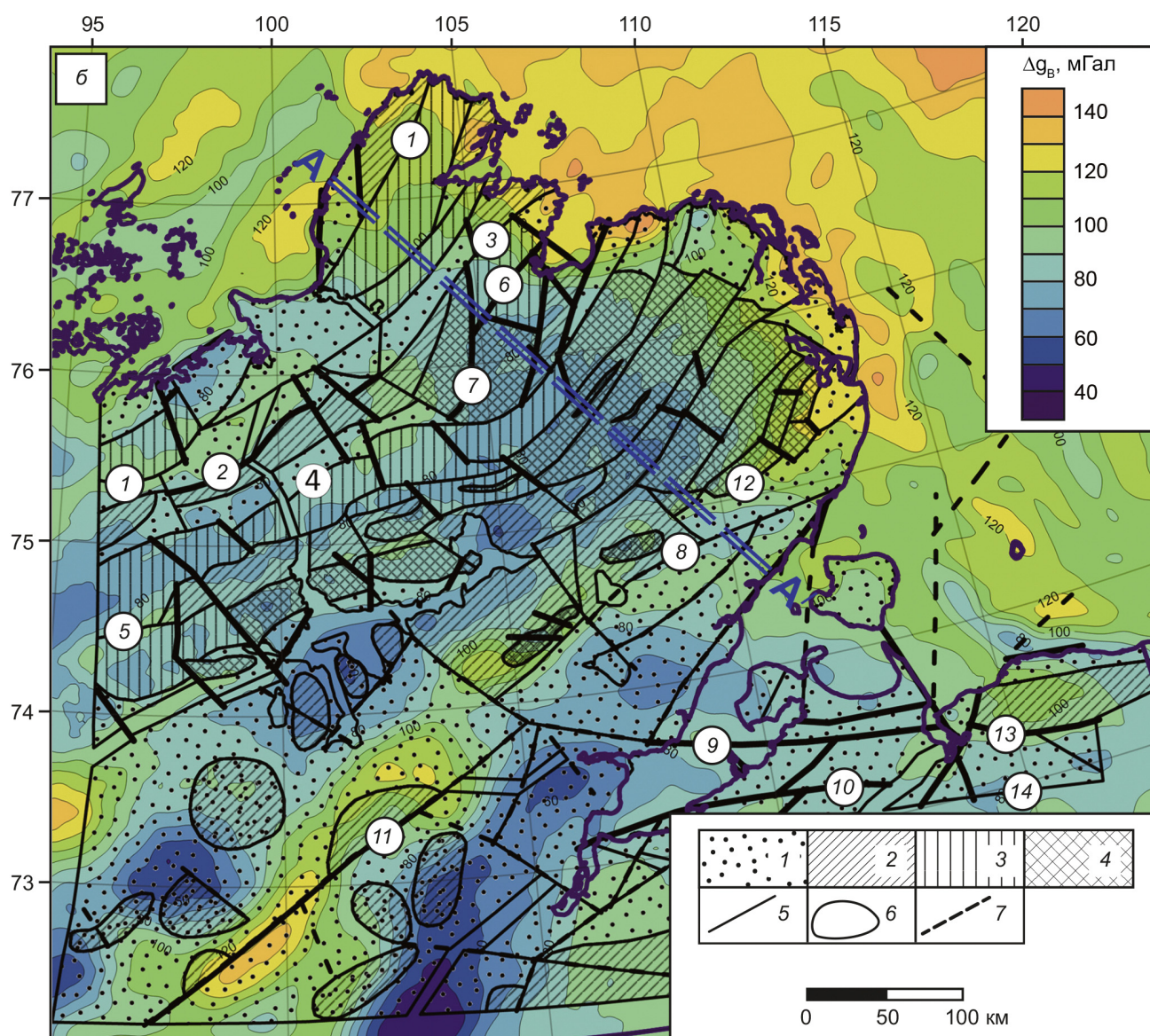


Рис. 3. Гравитационные аномалии: *a* — в свободном воздухе; *б* — в редукции Буге, по данным Международного гравиметрического бюро (BGI), и выделенные неотектонические структуры. Суммарные конэрозивные поднятия, м: 1 — до 200 м, 2 — 201–300, 3 — 301–500, 4 — более 500; 5 — разломы, 6 — отдельные локальные поднятия, 7 — линейменты. AA' — линия профиля. Цифры в кружках — разломы (см. рис. 2)

мозаичный знакопеременный характер с четкой приуроченностью к наиболее поднятым зонам имеет и пространственное распределение результатов фильтрации аномалии Буге с применением фильтра Баттерворта с частотой среза, отвечающей 30 км, который отражает проявление в основном коровых аномальных структур (рис. 4, в). В то же время результаты применения фильтра Баттерворта с частотой среза, отвечающей 30–100 км, которые позволяет выявить влияние верхнемантийных неоднородностей (рис. 4, г), показывают полосы контрастных значений, обрамляющих наиболее поднятые области, в то время как внутри горного сооружения вариации этого параметра значительно менее выражены. Как представляется, такие особенности показывают, что в целом горное сооружение Восточного Таймыра имеет верхнемантийные корни,

в то время как все структуры внутри этого поднятия имеют коровый (возможно, верхнекоровый) характер. Таким образом, наиболее поднятые блоки и их границы хорошо прослеживаются по особенностям трансформантов гравитационного поля.

Характер соотношения аномалий в свободном воздухе и Буге с величинами поднятий и мощностью коры хорошо виден на профилях по линии AA' (рис. 5, а, б). Аномалии в свободном воздухе достаточно хорошо коррелируют с высотами поднятий. Проявляется также корреляция Δg_{fa} с глубиной Мохо, и, соответственно, мощностью коры (коэффициент корреляции Пирсона 0,5), особенно в центральной части профиля, соответствующей поднятиям Людйттынэти. В то же время аномалия Буге Δg_B находится в отрицательной корреляции (коэффициент корреляции Пирсона 0,52) с глуби-



ной Мохо. На графике также видно, что мощность коры резко уменьшается на границе Быррангского горного сооружения и Северо-Сибирской равнины. Визуальный анализ графиков Δg_B вдоль профиля AA' (рис. 5, б) позволяет заключить, что точки пересечения с границами выявленных блоковых структур, как правило, соответствуют особенностям данного графика (экстремумам или точкам перегиба). Более четко это видно при сопоставлении с графиками производных Δg_B вдоль профиля (рис. 5, в), а также с результатами фильтрации Δg_B с применением фильтра Баттерворта с частотой среза, отвечающей 30 (BHP_{30}) и 30–100 (BHP_{30-100}) км (рис. 5, г). На этих графиках видно, что частота смены знака аномалий и их амплитуда значительно меняется по простиранию. Наибольший размах характерен для Быррангского горного сооружения и Фаддеевских хребтов, расположенных на юге Северо-Таймырского горного сооружения. Большая часть границ выявленных блоков и разрывных нарушений соответствует мак-

симумам или минимумам графиков производных силы тяжести. Особенно четко по геофизическим аномалиям выявляется Главный Таймырский (ГТН) и Дорожнинский (Д) надвиги, а также Чернохребтинский (ЧХ) разлом (рис. 5, г).

Сейсмичность. Согласно каталогу International Seismological Centre (ISC) за 1922–2023 гг. [International..., 2023] сейсмичность региона представлена 280 землетрясениями (рис. 6), из которых непосредственно в район Таймырского п-ова попадают 7. Магнитуда землетрясений варьирует от 2,2 до 5,4, но у большинства событий она не определена. Глубина землетрясений составляет от 3 до 30 км, при этом большинство событий отнесено к уровням 10 и 20 км. Такие значения глубины в каталоге указывают на то, что для данных событий глубина не может быть определена точно, и землетрясения относятся либо к коровым (20 км), либо к верхнекоровым (10 км). Самые значительные сейсмические события собственно на п-ове Таймыр, — землетрясения 1964,

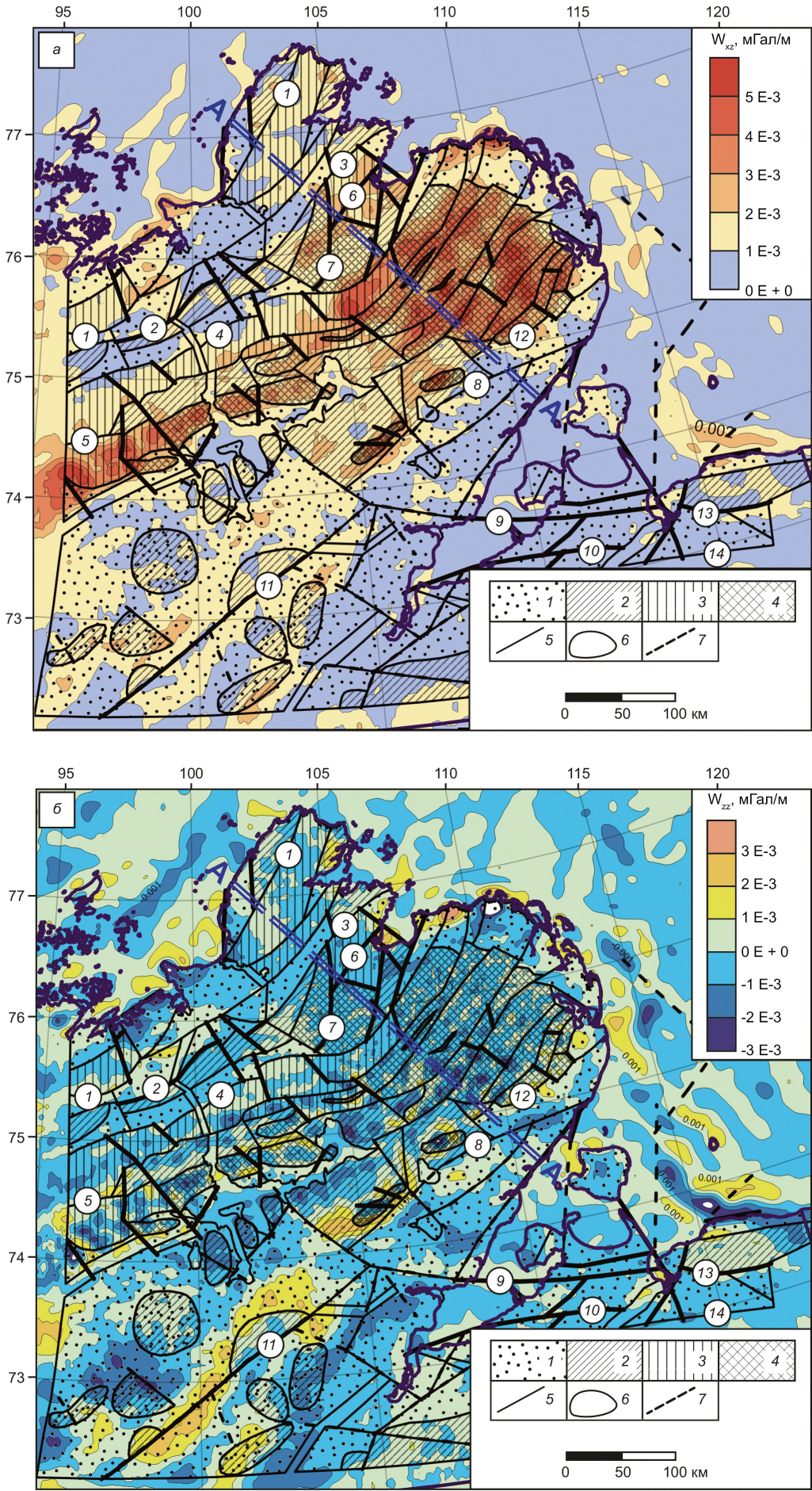
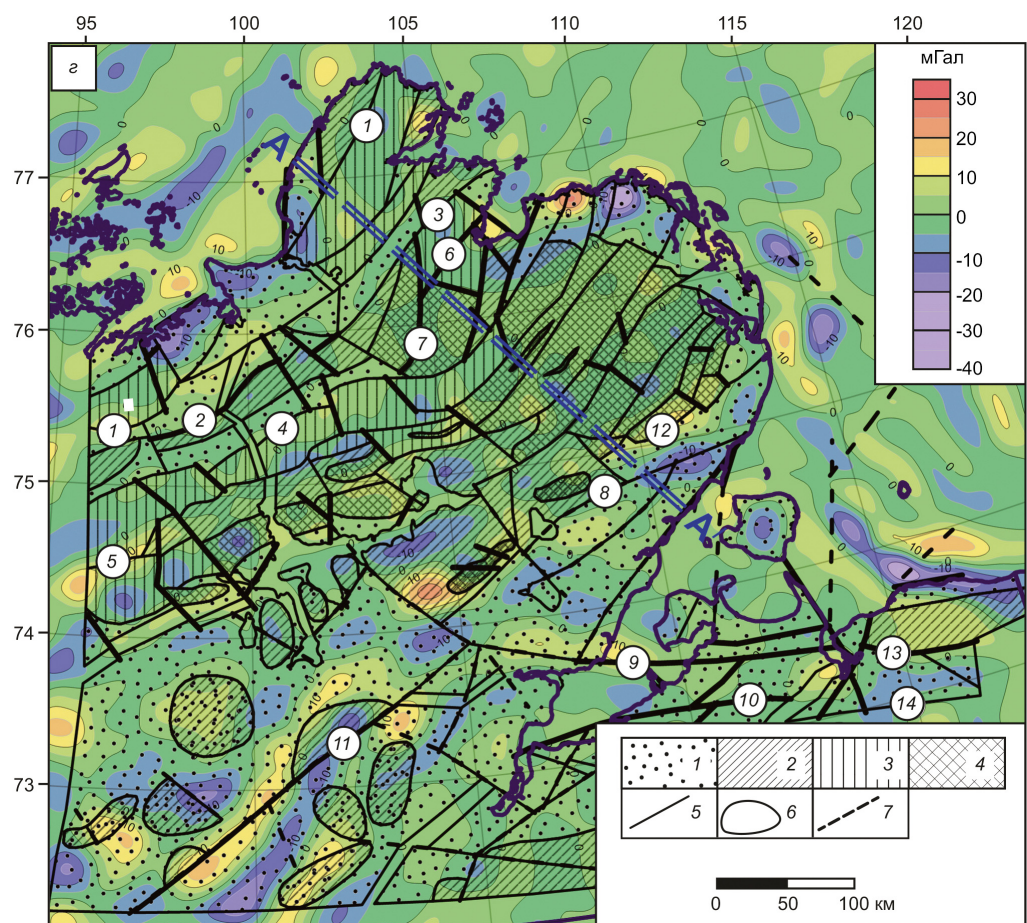
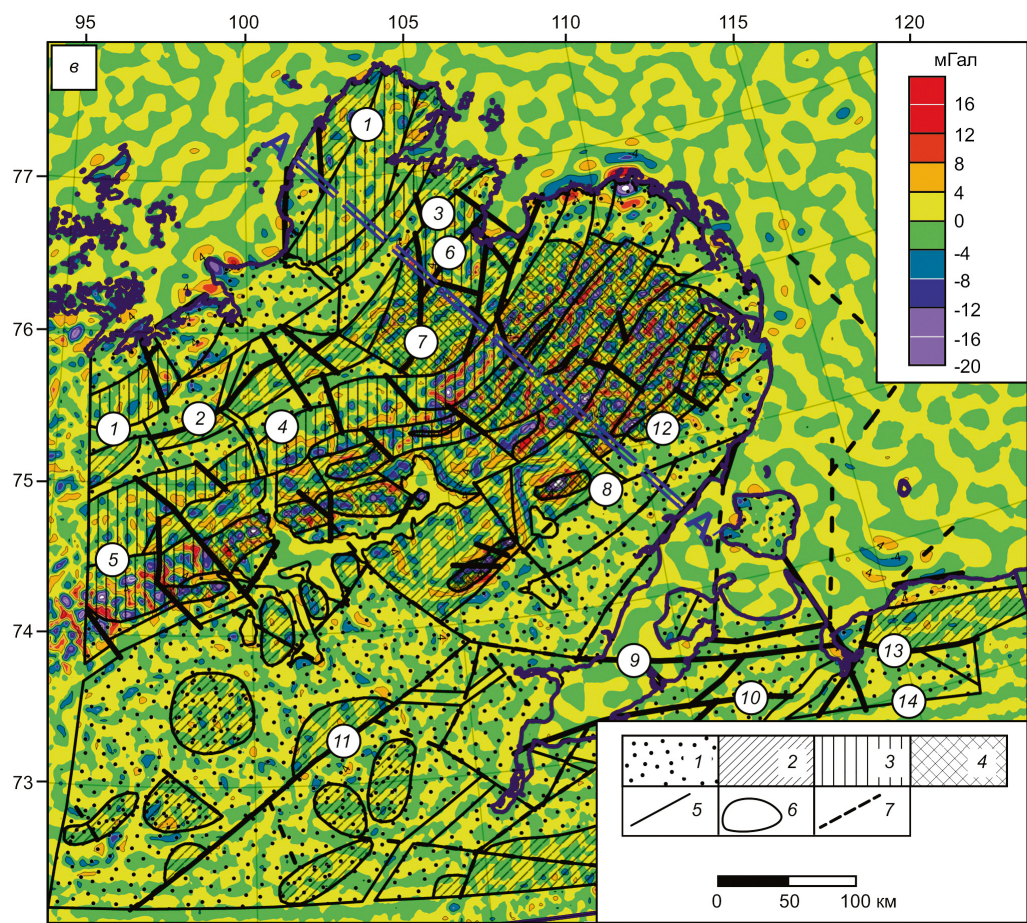


Рис. 4. Трансформанты гравитационных аномалий в редукции Буге: а — горизонтальный градиент (W_{xz}); б — вертикальный градиент (W_{zz}); в — результаты фильтрации с применение фильтра Баттерворта с частотой среза, отвечающей 30 км (BHP_{30}); г — с частотой среза, отвечающей 30–100 км (BHP_{30-100}) и выделенные неотектонические структуры. Условные обозначения см. рис. 3



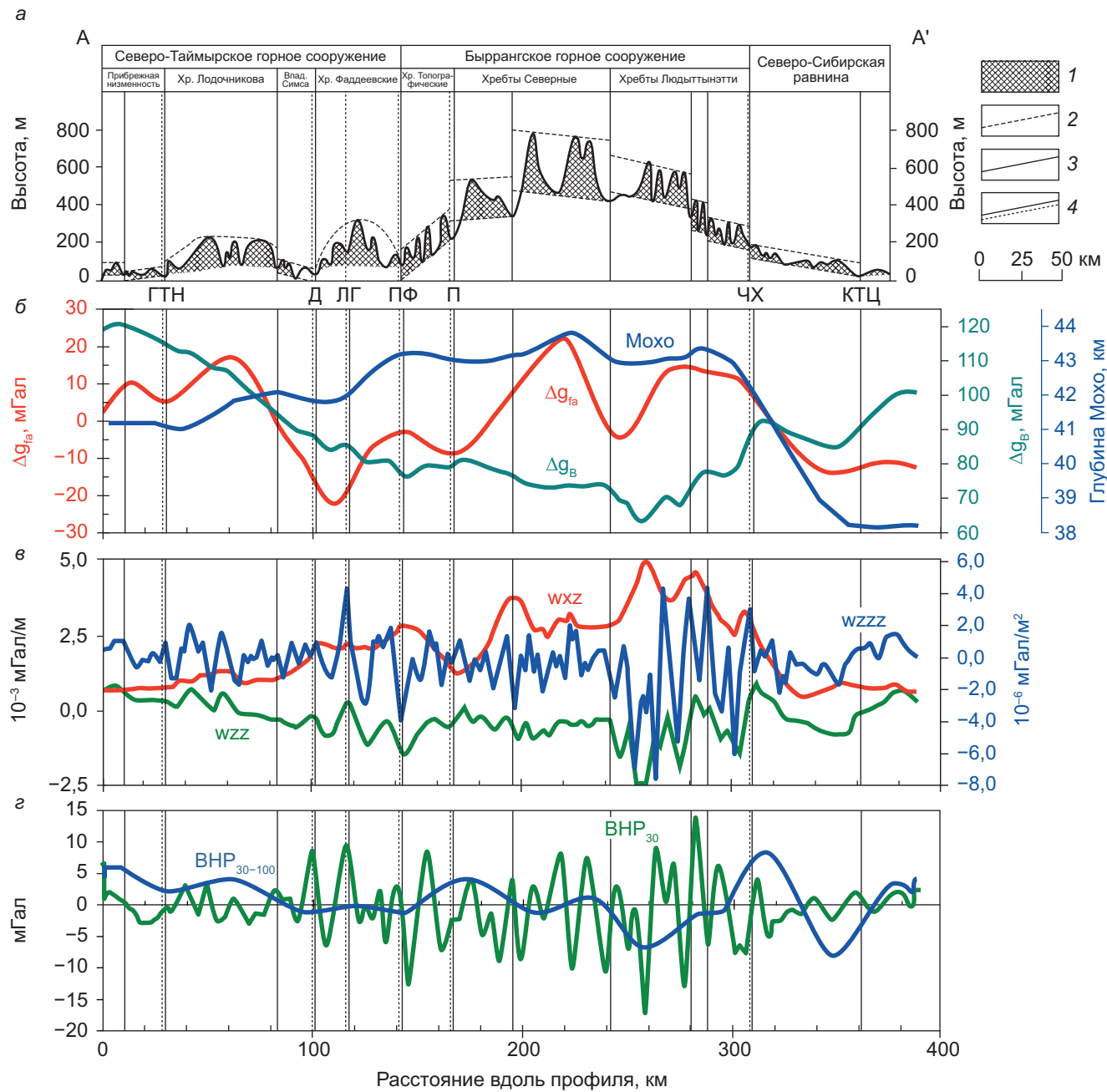


Рис. 5. Вариации гравитационных аномалий и их трансформантов по линии профиля А–А'. а — геоморфологический профиль [по Брянцева и др., 2021; с изменениями]; б — гравитационные аномалии в свободном воздухе (Δg_{fa}) и Буге (Δg_B) и глубина границы Мохо; в — горизонтальный (W_{xz}) и вертикальный (W_{zz}) градиенты аномалий Буге (левая шкала) и вторая вертикальная производная (W_{zzz} , правая шкала); з — результаты фильтрации аномалий Буге с применение фильтра Баттерворта с частотой среза, отвечающей 30 (BHP₃₀) и 30–100 (BHP_{30–100}) км. Условные обозначения: 1 — горный массив, расчлененный крупными реками; 2 — обобщенная поверхность поднятий горного сооружения; 3 — границы блоков, установленные по геоморфологическим данным; 4 — границы блоков, установленные по геоморфологическим и геологическим данным

1986, 1996 и 2015 гг. ($m_b = 3,9\text{--}4,6$), а также Таймырское землетрясение 1990 г., имеющее максимальную для п-ова Таймыр магнитуду $m_b = 4,9$ и интенсивность в ближней к эпицентру зоне VI–VII баллов по шкале MSK–64 [Середкина, Козьмин, 2017].

Эпицентры в районе землетрясений выстраиваются в зону северо-северо-западного простирания от Анабарского залива на юге до горных сооружений Таймыра на севере. Положение и общее направление указанной сейсмофокальной структуры в целом со-

впадает с рядом молодых секущих разломов в зоне Быррангских хребтов и Северо-Сибирской равнины, выделенных структурно-геоморфологическим методом. В пределах акватории моря Лаптевых они также тяготеют к линеаментам северо-западного простирания, выделенных по геоморфологическим данным восточнее о. Большой Бегичев. Это является свидетельством активности данных структур в настоящее время. К зоне указанных линеаментов приурочены также вытянутая зона контрастных

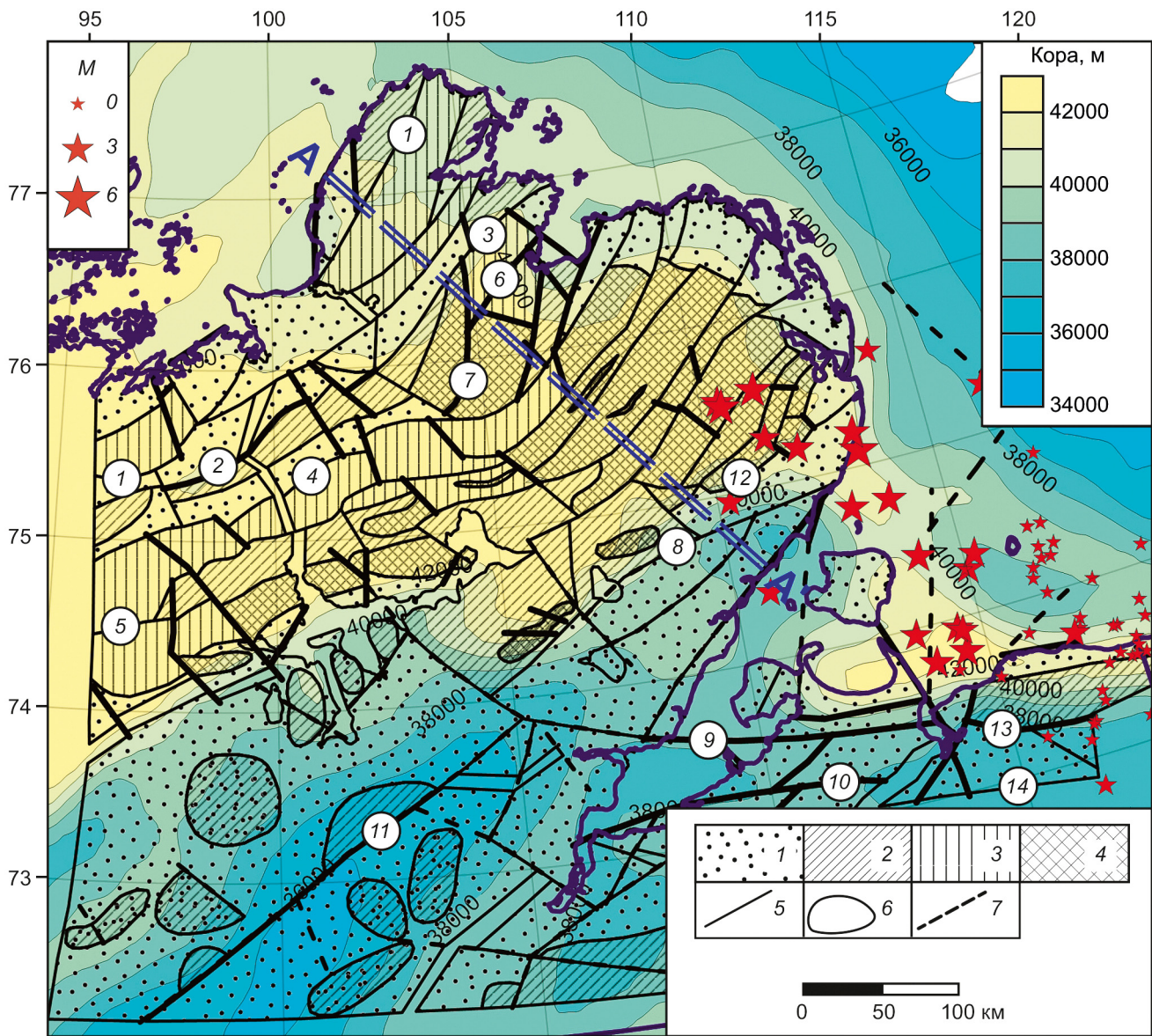


Рис. 6. Глубина границы Мохо по модели ArcCRUST [Lebedeva-Ivanova et al., 2019], эпицентры землетрясений по данным ISC за 1922–2023 гг. (звездочки) и результаты СГК. Условные обозначения см. рис. 3

значений гравитационных аномалий и их трансформантов (рис. 3; 4), что также указывает на активность данной зоны. Сопоставление с вариациями глубины границы Мохо по модели ArcCRUST [Lebedeva-Ivanova, et al., 2019], позволяет отметить, что выделенная сейсмически активная зона находится в полосе относительно повышенных величин мощности коры (до 42 км), которая отделяет Хатанский залив от моря Лаптевых и соединяется с зоной утолщенной коры на северо-востоке Таймыра (рис. 6). Отметим, что этим областям относительно более мощной коры в целом закономерно соответствует зона относительно пониженных значений Δg_B (рис. 4).

Заключение. Согласно проведенному структурно-геоморфологическому анализу рельефа наблюдается нарастание интенсивности неотектонических процессов с юго-запада на северо-восток, что, возможно, обусловлено приближением к зоне спрединга хребта Гаккеля Северного Ледовитого океана.

В результате анализа гравитационных аномалий установлено, что они имеют характер знакопеременных зон, вытянутых вдоль основных тектонических и структурных элементов Восточного Таймыра с ЮЗ на СВ. Аномалии в свободном воздухе в целом коррелируют с рельефом и достигают своих наибольших значений в области наибольших величин конэрозионных поднятий. Область этих поднятий характеризуется относительно пониженными значениями аномалий Буге. При этом аномалия Буге находится в обратной корреляции с глубиной Мохо.

Анализ трансформантов гравитационного поля позволил установить приуроченность выделенных блоков и их границ к особенностям поля трансформантов. Максимальные значения горизонтального градиента гравитационного поля W_{xz} , а также самые контрастные вариации достаточно точно соответствуют наиболее поднятым структурам. Вариации вертикального градиента W_{zz} достаточно хорошо

соотносятся с границами выделяемых блоков, особенно наиболее поднятых. Зоны повышенного вертикального градиента W_{zz} также соотносятся с зонами высокой вариации мощности коры. Поле второй вертикальной производной гравитационного поля W_{zzz} , а также результаты применения фильтра Баттерворта с частотой среза, отвечающей 30 км, имеют выраженный мозаичный знакопеременный характер, причем наиболее контрастные области соответствуют наибольшим поднятиям. Результаты применения фильтра Баттерворта с частотой среза, отвечающей 30–100 км позволяют выделить зоны контрастных изменений, обрамляющих горные сооружения. Выявленные особенности показывают, что в целом горное сооружение Восточного Таймыра имеет верхнемантийные корни, в то время как все структуры внутри этого поднятия имеют коровый (возможно, верхнекоровый) характер. Большая часть границ выявленных блоков и разрывных нарушений соответствует максимумам или минимумам графиков производных силы тяжести.

Особенности распределения гравитационных аномалий указывает на разнонаправленность вертикальных движений в этом районе, рост локальных поднятий во впадинах при общем их прогибании, а также подтверждает рост горных сооружений, которые еще не успели скомпенсироваться.

Сопоставление результатов структурно-геоморфологического анализа и сейсмических данных позволило выделить в пределах Восточного Таймыра и сопредельных территорий приуроченность зон сейсмичности к разломам (доказанным и выделенным по геоморфологическим данным), активным в кайнозойский период, а также к вытянутой зоне контрастных значений гравитационных аномалий и их трансформантов северо-западного простирания. Эти результаты согласуются с материалами, изложенными в работе [Imaeva, et al., 2019],

в которой Лено-Таймырская сейсмоактивная зона пространственно связана также с особенностями других геофизических полей — с линейной магнитной аномалией и градиентной системой аномалий силы тяжести.

В статье [Козьмин и др., 2014] отмечено, что на западной окраине Лаптевского блока (в районе Таймыра), по данным механизма очага события 1980 г., действует режим сжатия, вероятно, как реакция на рифтинг, господствующий в пределах главной полосы эпицентров. Это также согласуется с оценками скорости видимого поднятия побережья моря Лаптевых, которые по данным примерно за 10-летний период измерений скорости современного тектонического поднятия для полуострова Таймыр составили $+(1-2)$ мм/год (с учетом изменения уровня океана).

Конфигурация структур, сформированных в ходе пермо-триасовых тектонических событий на Таймыре, в целом хорошо согласуется с современными направлениями (ЮЗ–СВ) геопотенциального напряжения в этом районе. Индикаторами палеонапряжения являются дайки и разломы этого возраста. Результаты указывают на отсутствие существенных изменений поля литосферных напряжений после образования триасовых рифтовых бассейнов и даек [Schiffer, et al., 2018].

Благодарности. Авторы благодарят доцента К.М. Кузнецова за помощь в отборе, обработке и построении данных гравитационных аномалий. Авторы признательны рецензентам — канд. физ.-мат. наук Н.А. Сергеевой (ГЦ РАН) и докт. геол.-минер. наук А.М. Макееву (Ин-т геоэкологии им. Е.М. Сергеева) за полезные замечания и комментарии.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А16-116033010119-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасенков А.П., Лыгин И.В., Обухов А.Н. и др. Объемная реконструкция тектонических элементов Енисей-Хатангской рифтовой системы по результатам комплексной геолого-геофизической интерпретации // Геофизика. 2017. № 2. С. 60–70.
- Афанасенков А.П., Никишин А.М., Унгер А.В. и др. Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника. 2016. № 2. С. 23–42.
- Афанасенков А.П., Обухов А.Н., Чикишев А.А. и др. Тектоника северного обрамления Сибирской платформы по результатам анализа геолого-геофизических данных // Формирование и размещение залежей нефти и газа. 2018. № 1. С. 7–27.
- Брянцева Г.В., Демина Л.И., Промыслова М.Ю., Косевич Н.И. Новейшие структуры Западного Таймыра // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 6. С. 17–23.
- Брянцева Г.В., Демина Л.И., Промыслова М.Ю., Косевич Н.И. Новейшие структуры Северо-восточного Таймыра // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 4. С. 60–69.

Верниковский В.А. Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1996. 202 с.

Глаголев П.А., Маданов В.Ф., Михайлова М.П. Геология и нефтегазоносность Енисей-Хатангского прогиба. М.: ИГиРГИ. 1994. 118 с.

Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В., Межубовский В.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Таймырско-Североземельская. Лист S-49 — Хатангский залив. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. 275 с.

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

Костенко Н.П. Геоморфология. М.: МГУ, 1999. 383 с.

Кушинир Д.Г. Геодинамика полуострова Таймыр по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 81–92. doi: 10.5800/GT-2018-9-1-0338.

Мусатов Е.Е. Неотектоника арктических континентальных окраин // Физика Земли. 1996. № 12. С. 72–78.

Объяснительная записка к Тектонической карте морей Карского и Лаптевых и севера Сибири (масштаб 1:2 500 000) / Отв. ред. Н.А. Богданов, В.Е. Хаин. М.: Ин-т литосферы окраинных и внутренних морей РАН, 1998. 128 с.

Середкина А.И., Козьмин Б.М. Очаговые параметры таймырского землетрясения 9 июня 1990 г. // ДАН. 2017. Т. 473, № 2. С. 214–217.

Bonvalot S., Balmino G., Briais A., et al. World Gravity Map. Bureau Gravimetrique International (BGI). CGMW-BGI-CNES-IRD Ed. Paris, 2012.

Danielson J.J., Gesch D.B. Global multi-resolution terrain elevation data 2010 (GMTED2010): U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1073. 2011. 26 p.

Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Dynamics of the Zones of Strong Earthquake Epicenters in the Arctic–Asian

Seismic Belt // *Geosciences*. 2019. Vol. 9, N 168. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040168>.

International Seismological Centre. On-line Bulletin, 2023. <https://doi.org/10.31905/D808B830> (дата обращения: 26.01.2024).

Lebedeva-Ivanova N., Gaina C., Minakov A., Kashubin S. ArcCRUST: Arctic crustal thickness from 3D gravity inversion // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. Vol. 20 (7). P. 3225–3247. <https://doi.org/10.1029/2018GC008098>.

Schiffer C., Tegner C., Schaeffer A., et al. High Arctic geopotential stress field and implications for geodynamic evolution // *Geological Society, London, Special Publications*. 2018, Vol. 460 (1). P. 441–465. <https://doi.org/10.1144/SP460.6>

Статья поступила в редакцию 05.03.2024,
одобрена после рецензирования 21.03.2024,
принята к публикации 19.06.2024