

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И ИСТОЧНИКИ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ В ЮЖНО-ТАТАРСКОМ БАССЕЙНЕ (ТАТАРСКИЙ ПРОЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

© 2024 З.Н. Прошкина, М.Г. Валитов, И.А. Сигеев

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия, 690041;
e-mail: pro-zo@yandex.ru*

Поступила в редакцию 02.08.2024; после доработки 05.11.2024; принята в печать 25.12.2024

Представлены результаты структурно-плотностного моделирования вдоль профиля, пересекающего структуры в южной части Южно-Татарского бассейна, расположенного в Татарском проливе на севере Японского моря. В результате проведенного моделирования изучено глубинное строение района, проведено его сопоставление со строением ранее изученной центральной части этого бассейна и выявлены новые особенности глубинного строения его южной части. Методом касательных были рассчитаны глубины залегания верхних и нижних кромок намагниченных объектов, который показал их пространственную приуроченность к верхней коре, преимущественно к зонам разломов и вулканическим структурам. Структурно-плотностной разрез земной коры в районе работ демонстрирует блоковое строение фундамента и, возможно, его дифференциацию по составу. В центральной части разреза выявлена измененная континентальная кора с признаками базификации.

Ключевые слова: структурно-плотностное моделирование, магнитоактивные объекты, глубинное строение, рифтогенез.

ВВЕДЕНИЕ

Южно-Татарский бассейн (ЮТБ) является частью Татарского трога (рис. 1), отделяющего о. Сахалин от Евразийской континентальной окраины. В центральной части бассейна отмечаются наибольшие глубины дна, достигающие 1700 м, и осадочный чехол максимальной мощности 9 км. Основное направление структур северо-восточное и субширотное. Процессы, сформировавшие Татарский трог, можно условно разделить на локальные и глобальные (региональные). К глобальным процессам относятся процессы, связанные с зоной конвергенции Тихоокеанской, Евразийской и Северо-Американской литосферных плит, составными частями которых являются более мелкие блоки: Амурский и Охотоморский (Wei, Seno, 1998). Здесь происходят активные геодинамические процессы, масштаб которых охватывает весь северо-западный сектор Тихоокеанской зоны перехода. Локальные процессы связаны с развитием отдельных структур в Татарском троге, где

глобальные процессы оказывали лишь косвенное влияние, однако их необходимо рассматривать в едином ключе.

Татарский трог включает в себя три крупных осадочных бассейна Южно-Татарский (ЮТБ), Северо-Татарский (СТБ) и Иссикари-Западно-Сахалинский (ИЗСБ), разделенные между собой межбассейновыми поднятиями, к которым относятся Красногорско-Ильинский блок и Совгаваньское поднятие, расположенные между ЮТБ и СТБ, Пионерское поднятие, отделяющее ЮТБ от ИЗСБ. В свою очередь внутри бассейнов выделяются отдельные морфоструктурные элементы, основные из них рассматриваются в настоящей работе и представлены на рис.1.

Глубоководная часть ЮТБ представлена Тернейским прогибом (рис. 1), образованным, как считается многими исследователями, в результате рифтинга в период раннего палеогена — раннего неогена (Жаров, 2002, 2004; Злобин и др., 2011, 2011; Родников и др., 2005). Краевые части структуры сформированы блоками земной коры, подвергшейся вулкано-тектоническим процессам,

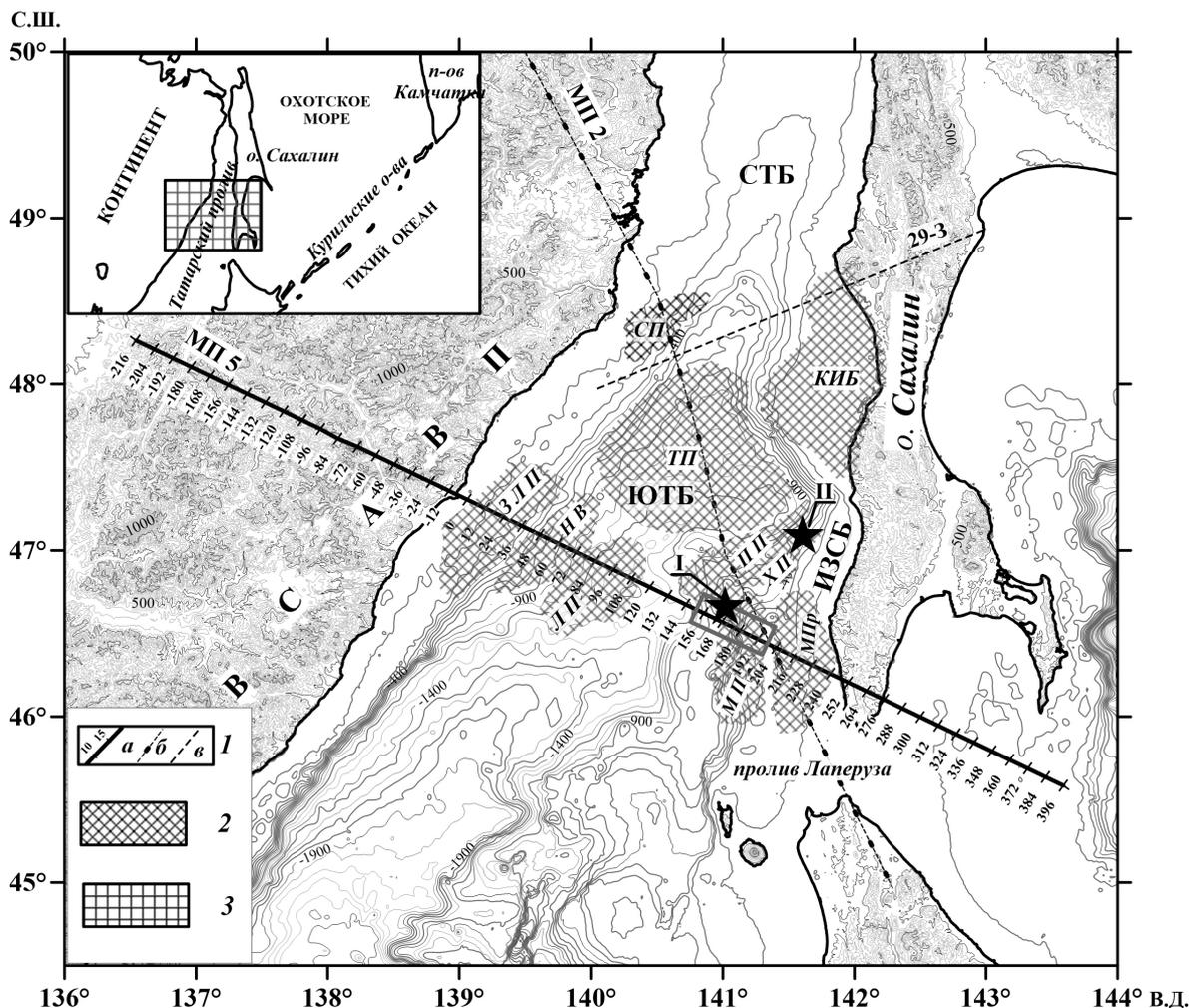


Рис. 1. Обзорная карта района исследования с изолиниями рельефа (в м): 1 — профили: а — профиль структурно-плотностного моделирования с отметками в км, б — опорный профиль, в качестве которого использовался профиль структурно-плотностного моделирования МП 2, выполненный ранее (Прошкина и др., 2023), в — профиль ГС3 29-3 (Глубинное..., 1971), используемый для закрепления опорных границ на МП 2; 2 — основные морфоструктуры в районе исследования; 3 — район работ на врезке. Эпицентры сильных коровых землетрясений отмечены звездочками, цифры рядом: I — Невельское землетрясение 2 августа 2007 г., $M = 6.2$; $H = 5$ км (Левин, 2007; <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>); II — Монеронское землетрясение 5 сентября 1971 г., $M = 7.3$; $H = 18$ км (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>). Прямоугольником отмечен участок профиля, где производился расчет глубины залегания кромок магнитоактивного тела, показанный на рис. 3.

ВСАВП — Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс; СТБ — Северо-Татарский бассейн; ИЗСБ — Иссикари-Западно-Сахалинский бассейн, включающий морфоструктуры: ХП — Холмский прогиб, МП — Монеронское поднятие, МПр — Монеронский прогиб; ЮТБ — Южно-Татарский бассейн, включающий морфоструктуры: ЗЛП — Западно-Лопатинское поднятие, ЛП — Лопатинское поднятие, НВ — Нельминская впадина, ТП — Тернейский прогиб; межбассейновые поднятия: ПП — Пионерское поднятие, КИБ — Красногорско-Ильинский блок, СП — Совгаваньское поднятие (по (Жаров, 2004)).

Fig. 1. Overview map of the study area with relief isolines (in m): 1 — profiles: а — profile of structural-density modeling with marks in km; б — the profile of structural-density modeling p МП 2 (Proshkina et al., 2023), which was used as reference profile, в — profile ГС3 29-3 (Glubinnoe..., 1971), used for fixing the reference boundaries on МП 2 profile; 2 — main morphostructures in the study area. 3 — area of works (inset). Epicenters of strong crustal earthquakes are marked with asterisks, numbers next to them: I — Nevelskoe earthquake on August 2, 2007, $M = 6.2$; $H = 5$ km (Levin, 2007; <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>); II — Moneron earthquake on September 5, 1971, $M = 7.3$; $H = 18$ km (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>). The rectangle marks the section of the profile where the depth of the edges of the magnetically active body was calculated, shown in Fig. 3.

ВСАВП — East Sikhote-Alin Volcanic Belt; СТБ — North Tatar Basin; ИЗСБ — Issikari-West Sakhalin Basin, including morphostructures: ХП — Kholmsk Trough, МП — Moneron Rise, МПр — Moneron Trough; ЮТБ — South Tatar Basin, including morphostructures: ЗЛП — West Lopatinskoye Rise, ЛП — Lopatinskoye Rise, НВ — Nelminskaya Depression, ТП — Terneisky Trough; interbasin uplifts: ПП — Pioneer Rise, КИБ — Krasnogorsko-Ilyinsky Block (according to (Zharov, 2004)).

сопровождаящим рифтогенез в центральном прогибе. Кроме локального рифтогенеза, образование Татарского трога связано с влиянием глобальной геодинамики Тихоокеанской зоны перехода, сопровождающейся активной сейсмичностью и вулканизмом, о чем свидетельствует наличие сейсмоактивных зон (Злобин и др., 2011; 2012, Левин, 2007; Тараканов, Андреева, 2012) и обширное развитие вулканических комплексов, как в пределах о. Сахалин, так и на окраине континента (Карта..., 1990, 1994).

Чтобы уточнить особенности глубинного строения центральной части ЮТБ, ранее нами были рассчитаны две структурно-плотностные модели земной коры, пересекающие наиболее глубокую часть Тернейского прогиба и его северный борт (Прошкина и др., 2023). На основе этих моделей был сделан вывод, что под центральной частью Тернейского прогиба земная кора сокращена и базифицирована, при этом ее северный борт в меньшей степени подвергся переработке, чему способствовал блок Красногорско-Ильинского поднятия, ограничивающий ЮТБ с северо-востока, и послуживший своеобразным «барьером» для распространения активного рифтогенеза в северном направлении (Прошкина и др., 2023). Для того чтобы проследить выявленные особенности глубинного строения в южной части бассейна нами был рассчитан еще один профиль структурно-плотностного моделирования (МП 5) (рис. 1), протягивающийся вдоль юго-западного борта Тернейского прогиба и пересекающий структуры континентального склона, глубоководную часть, а также вулканические возвышенности Иссикари-Западно-Сахалинского бассейна (ИЗСБ).

Целью данной работы было изучение особенностей глубинного строения в южной части ЮТБ и сопоставление с ранее выявленными признаками переработки сиалической коры в центральной части Тернейского прогиба. Посредством расчета глубины залегания кромок магнитоактивных объектов, выявленных в пределах модельного профиля по данным карты аномального магнитного поля (АМП) гГа, составленной научным сотрудником ТОИ ДВО РАН Н.С. Ли по итогам экспедиционных исследований 2017–2019 гг., проведено уточнение положения зон разломов и выявление отдельных структур, связанных с вулканизмом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе представлен стандартный метод двухмерного структурно-плотностного (гравитационного) моделирования земной коры, основной принцип которого заключается в подборе плотностей и геометрических

параметров сложных геологических объектов, аппроксимируемых простыми геометрическими фигурами, в нашем случае призмами с многоугольником в основании (Колпащикова, 2007). Для уменьшения количества вариантов моделирования и для достижения максимального соответствия реальной ситуации используется совокупность геолого-геофизической информации, включая результаты сейсмических исследований, из которых отбираются данные о положении скоростных границ и величинах скоростей упругих волн. Эти скоростные границы служат структурным каркасом, а скорости конвертируются в плотности по известным зависимостям (Никифоров и др., 2013). На основе этого создается первоначальная модель, которая затем уточняется в несколько итераций, учитывая расхождение между расчетными и наблюдаемыми данными: оно не должно превышать тройную погрешность съемки, в нашем случае отклонение наблюдаемого поля и модельного составило в среднем 3 мГал.

Такой подход был использован в программе, разработанной в лаборатории гравиметрии Тихоокеанским океанологическим институтом (ТОИ) ДВО РАН (Колпащикова, 2007) и применяемой нами в составлении моделей подобного рода. То, на основе каких данных будет составляться модель, зависит от расположения выбранного профиля и доступной геологической информации в пределах района работ. К сожалению, в районе исследования все значимые профили глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) находятся в удалении от модельного МП 5, поэтому было принято решения использовать уже рассчитанный профиль структурно-плотностного моделирования МП 2 (Прошкина и др., 2023), для привязки которого использовались данные профиля ГСЗ 29-3 (Глубинное..., 1971) (рис. 1). На основании этого в точке пересечения МП 5 с МП 2 были зафиксированы основные границы и значения плотности и осуществлена привязка расчетного профиля. Данные по границе Мохоровичича (Мохо) были получены путем оцифровки карты мощности земной коры представленной в работе (Жаров и др., 2004) и вынесения значений глубины на МП 5. Верхняя часть коры структур материкового склона между отметками 0–40 км имела дополнительную привязку в виде сейсмических границ и положения крупных разломов, снятых с профиля сейсмического профилирования, опубликованного в работе (Жаров и др., 2004). Это оказалось немаловажным, поскольку в районе материкового склона по данным (Глубинное..., 1971; Жаров и др., 2004) наблюдается значительное сокращение мощности земной коры, что вызывает у нас сомнение и требует дополнительного

уточнения, поскольку в работе (Ломтев и др., 2010) существование здесь приконтинентального вала не подтверждено.

Профиль МП 5 пересекает следующие структуры: Восточно-Сихотэ-Алиньский вулканический пояс (ВСАВП), Западно-Лопатинское поднятие, Нельминскую впадину, Лопатинское поднятие, Пионерское поднятие, Холмский прогиб, Монеронское поднятие, Монеронский прогиб, структуры южного Сахалина с выходом в Курильскую глубоководную котловину (рис. 1).

Данные о геологии в континентальном и островном районе профиля, были взяты с Государственных геологических карт СССР L-(53)(54); L-(54)(55), K-(55) масштаба 1:1000000 (Карта..., 1990; 1994).

При проведении структурно-плотностного моделирования учитывались данные по рельефу дна, полученные в рейсах ТОИ ДВО РАН в период проведения экспедиционных исследований 2017–2019 гг. (Валитов и др., 2019 а, 2019 б, 2020 а; 2020 б). Для достижения наилучшего соответствия расчетного поля силы тяжести и наблюдаемых данных использовался комплекс методов по определению плотности, в том числе, экстраполяция ранее полученных плотностных значений для МП 2 (Прошкина и др., 2023). В итоге после проведения нескольких итераций было рассчитано глубинное распределение плотности вдоль МП 5, гравитационный эффект от которого был сопоставим с наблюдаемым полем (рис. 2).

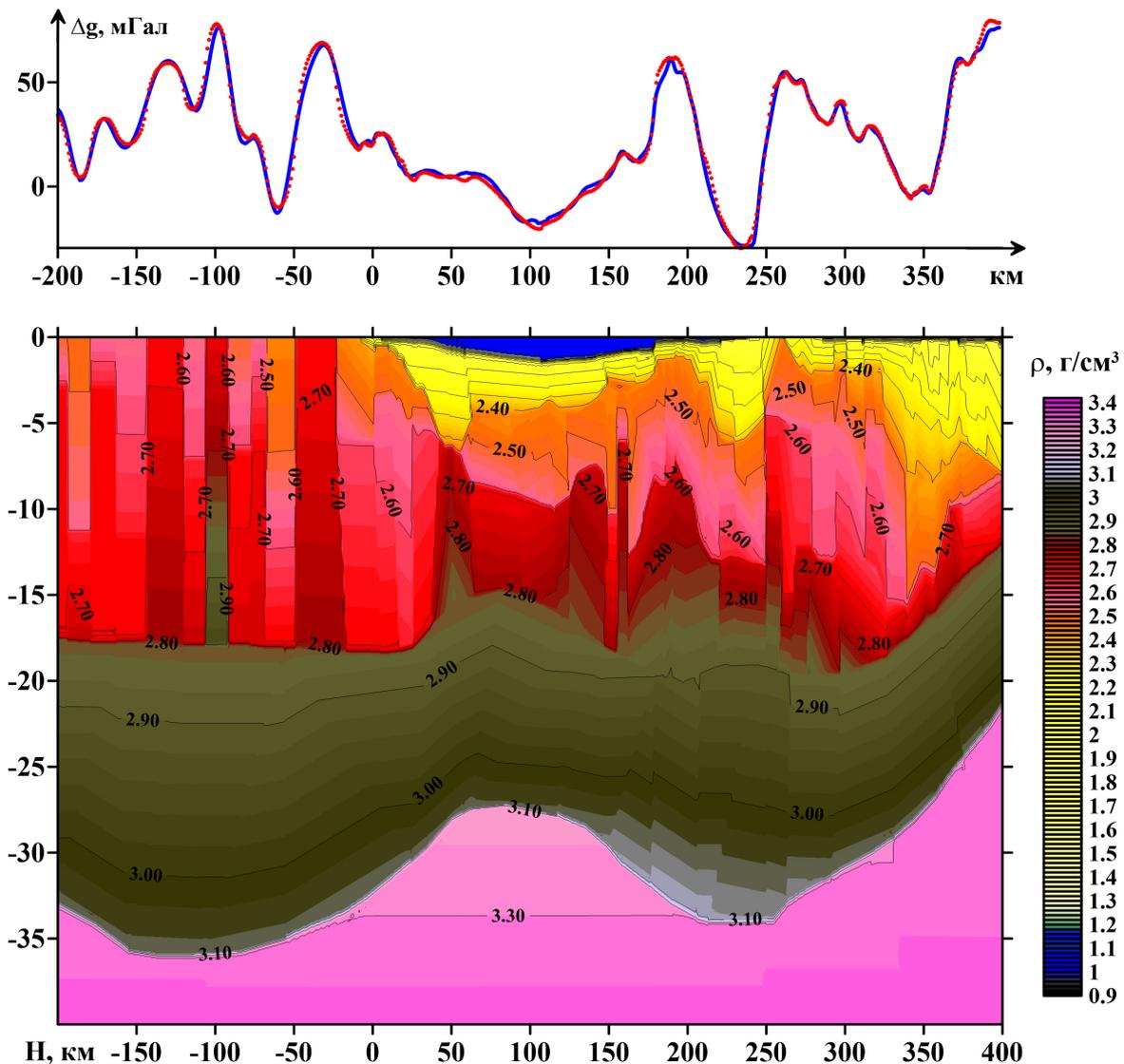


Рис. 2. Глубинное распределение плотности (ρ , г/см^3) в земной коре вдоль профиля МП 5. На графике: синяя линия — график наблюдаемого поля силы тяжести в редуции свободного воздуха (Δg , мГал), красная линия — график расчетного поля силы тяжести (Δg , мГал).

Fig. 2. Depth distribution of density (ρ , g/cm^3) in the Earth's crust along the МП 5 profile. On the graph: blue line — a plot of the observed gravity field in free air reduction (Δg , mGal), red line — a plot of the calculated gravity field (Δg , mGal).

Кроме геологической информации по суше, для интерпретации полученной модели были использованы данные морской магнитометрии, полученные в экспедициях 2017–2020 гг. (Валитов и др., 2019 а, 2019 б, 2020 а, 2020 б), которые использовались, в том числе, для расчета глубины кромок магнитных тел, попадающих в пределы МП 5.

Для расчета глубины залегания верхних и нижних кромок магнитных объектов методом касательных (Гладкий, 1990; Гравиразведка..., 1981; Знаменский, 1980; Логачев, Захаров, 1973; Магниторастведка..., 1980) выбирались наиболее интенсивные магнитные аномалии от 100 до 500 нТл, сглаженные, для подавления высокочастотного шума, с использованием усредняющих круговых палеток диаметром 35–50 км (рис. 3).

За начало координат принималась точка максимума на приведенной кривой, к которой проводились касательные к точкам перегиба. Для исключения неоднозначности положения точек перегиба, они находились путем расчета второй производной суммарного вектора АМП ΔT_a ($\Delta T''$), и построением соответствующего графика (рис. 3). На основе полученных касательных на ось абсцисс проецировались X_0 , X_m и X_{min} , соответственно (рис. 3).

По формуле (1) определялся входной параметр ξ :

$$\frac{X_0 - X_m}{X_m} = \xi \quad (1)$$

Далее, используя график (рис. 4), снимались значения коэффициентов K , K_1 , K_3 , K_4 , определяемых формой тела (Пятницкий, 1960).

По формулам (2 либо 3) определялась h — глубина залегания верхней кромки магнитоактивных масс:

$$h = \frac{X_0}{K_1} \quad (2)$$

либо,

$$h = \frac{X_0 - X_m}{K_3} \quad (3)$$

Затем по формуле (4) вычислялось значение $2b$, где b — полумощность пласта:

$$2b = 2Kh \quad (4)$$

И, наконец, глубина залегания нижней кромки магнитоактивных масс H вычислялась, используя формулу (5) (Булина, 1961):

$$H = 2X_{min} - 1.8(b + h) \quad (5)$$

Посредством данной методики были получены глубины нижней и верхней кромок магнитных объектов в пределах профиля МП 5, а наложение расчетных данных на профиль структурно-плотностного моделирования позволило обосновать локализацию тектонических разломов и детализировать вулканические структуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных исследований был составлен структурно-плотностной разрез земной коры вдоль профиля МП 5 (рис. 5). При «наполнении веществом» полученного разреза авторы настоящей работы опирались на данные геологических карт, обрамляющей территории (Карта..., 1990, 1994), а также расчеты глубины

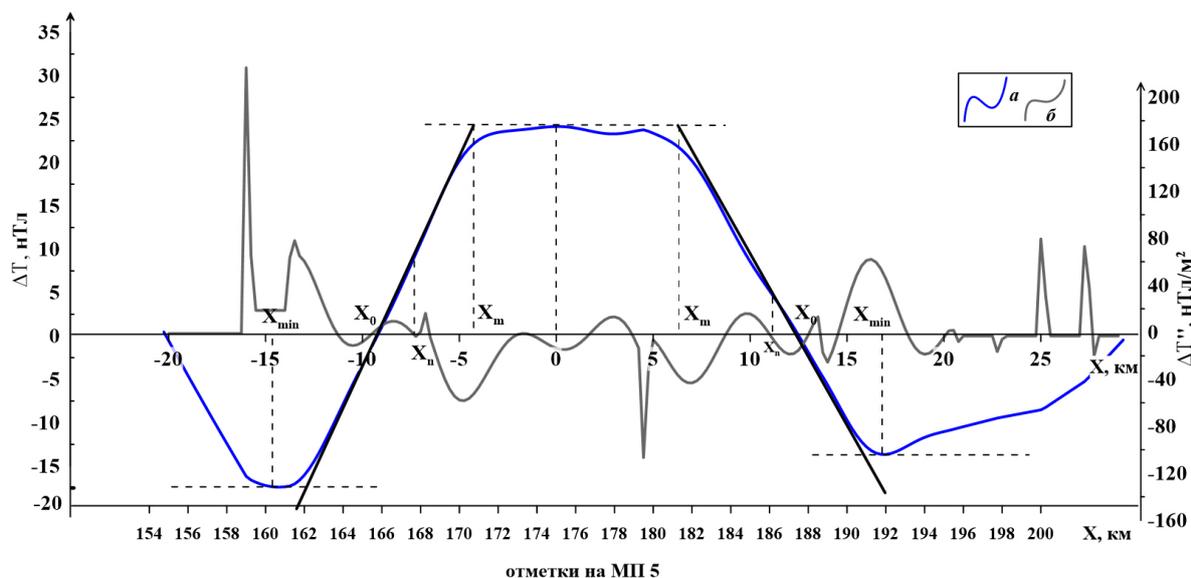


Рис. 3. Определение характерных точек (X_{min} , X_0 и X_m) по методу касательных: a — график АМП ΔT_a (нТл), b — график второй производной АМП $\Delta T_a''$ (нТл/м²).

Fig. 3. Determination of characteristic points (X_{min} , X_0 и X_m) by the tangent method: a — plot of AMF ΔT_a (nTl), b — plot of the second derivative of AMF $\Delta T_a''$ (nTl/m²).

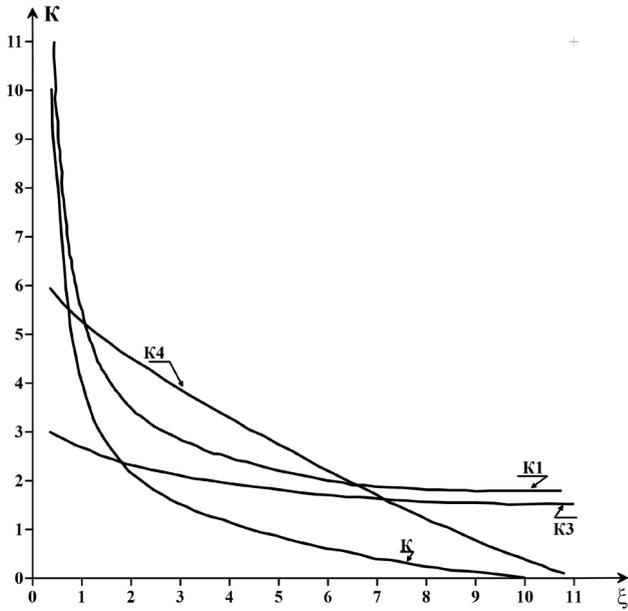


Рис. 4. Определение коэффициентов K , K_1 , K_3 , K_4 (безразмерные коэффициенты (Пятницкий, 1960)).

Fig. 4. Determination of coefficients K , K_1 , K_3 , K_4 (dimensionless coefficients (Pyatnitsky, 1960)).

кромок магнитоактивных тел, выявленных в пределах профиля, что послужило дополнительным источником информации при их геологическом истолковании.

Осадочный и базальтовый слой имеют выдержанные плотностные характеристики, изменяющиеся в пределах от 2.0 до 2.45 г/см³ и от 2.85 до 3.1 г/см³, соответственно (рис. 5). Мощность осадочного чехла варьирует от 1 до 7 км, достигая максимума под Нельминской впадиной. Что касается базальтового слоя, то его максимальная мощность 18 км выявлена в континентальной части, где общая мощность земной коры составляет 36 км. Это опровергает

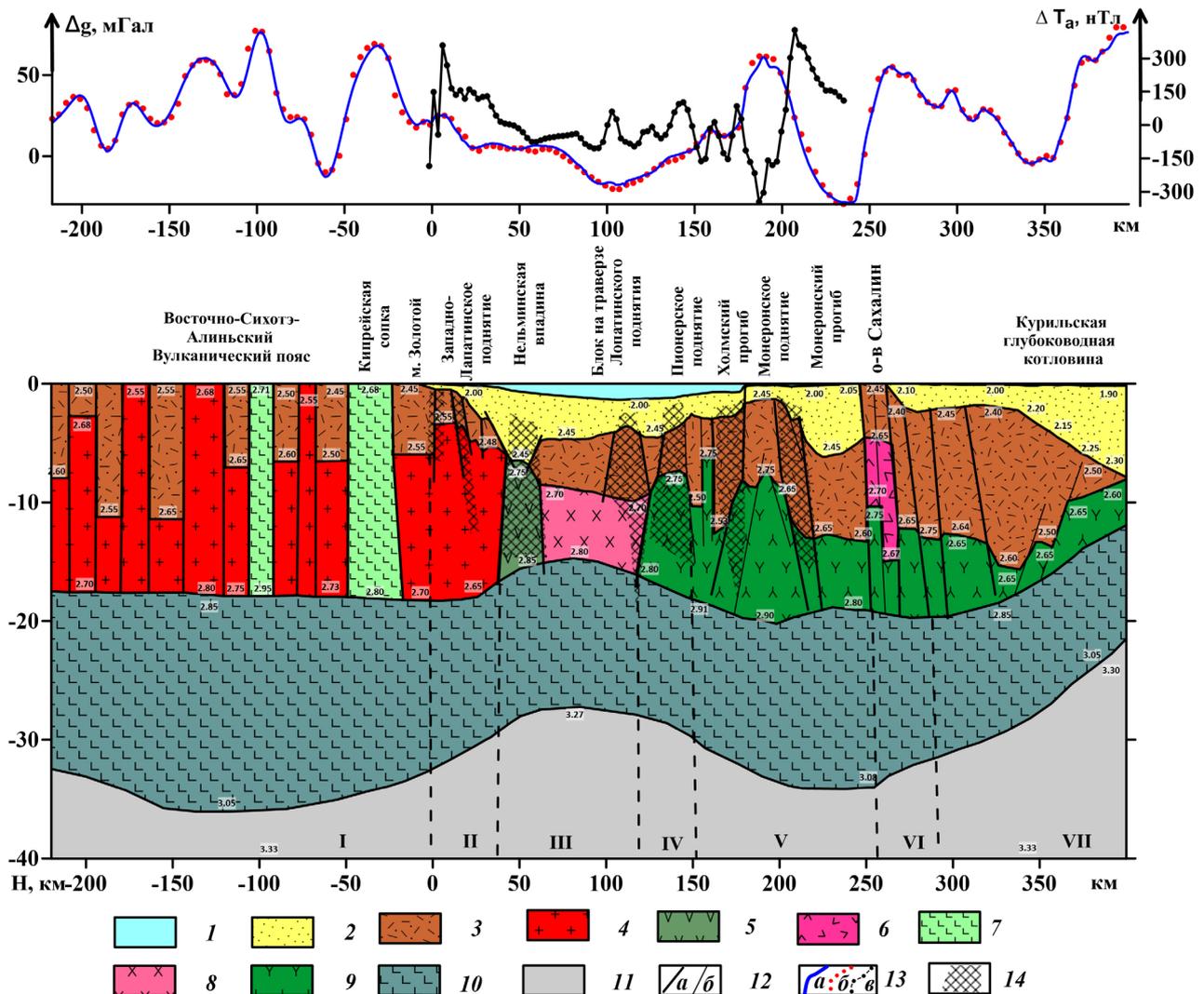


Рис. 5. Структурно-плотностная модель земной коры вдоль профиля МП 5: 1 — водный слой; 2 — осадочный слой; 3 — вулканогенно-осадочный слой; 4 — «гранитно-метаморфический» слой; 5 — блок базифицированного фундамента; 6 — андезитовые комплексы о. Сахалин; 7 — позднемиоценовые вулканы ВСАВП; 8 — блок сиалического фундамента с признаками базификации; 9 — фундамент вулканической природы; 10 — базальтовый слой; 11 — мантия; 12 — разломы: a — подтвержденные геологическими и сейсмическим

исследованиями (Жаров и др., 2004; Карта..., 1990, 1994), b — предполагаемые на границах блоков; $I3$ — графики геофизических полей: a — наблюдаемого поля силы тяжести в свободном воздухе (Δg , мГал), b — расчетного поля силы тяжести (Δg , мГал), v — аномального магнитного поля ΔT_a (нТл); $I4$ — контуры магнитного тела, верхняя и нижняя кромки которого рассчитаны методом касательных. I — материковые структуры; II — континентальный склон; III — структуры ЮТБ; IV — межбассейновое поднятие; V — структуры ИСЗБ; VI — структуры юга о-ва Сахалин; VII — восточный шельф Сахалина.

Fig. 5. Structural-density model of the Earth's crust along the МП 5 profile: 1 — aqueous layer; 2 — sedimentary layer; 3 — volcanogenic-sedimentary layer; 4 — «granite-metamorphic layer; 5 — block of basified basement; 6 — andesitic complexes of Sakhalin Island; 7 — Late Cretaceous volcanics of ВСАВП; 8 — block of sialic basement with signs of basification; 9 — basement of volcanic nature; 10 — basalt layer; 11 — mantle; 12 — faults: a — confirmed by geologic and seismic studies (Zharov et al., 2004; Map..., 1990, 1994), b — assumed at the block boundaries; $I3$ — plots of geophysical fields: a — observed gravity field in free air (Δg , mGal), b — calculated gravity field (Δg , mGal), v — anomalous magnetic field ΔT_a (nT); $I4$ — contours of the magnetic body, the upper and lower edges of which are calculated by the tangent method. I — continental structures; II — continental slope; III — ЮТБ structures; IV — interbasin uplift; V — ИСЗБ structures; VI — structures of the south of Sakhalin Island; VII — Sakhalin Island eastern shelf.

существование приконтинентального вала и сокращение мощности земной коры, выявленных по результатам сейсмических исследований (Глубинное...1971; Жаров и др., 2004), и подтверждает выводы В.Л. Ломтева с соавторами (2010). Значительное сокращение мощности базальтового слоя до 13 км выявлено восточнее под Нельминской впадиной, где поверхность Мохо испытывает подъем на 9 км с одновременным уменьшением общей мощности земной коры до 27 км. Далее под о. Сахалин нижняя граница базальтового слоя вновь опускается до отметки 34 км, при этом его мощность остается в пределах 14–15 км, плавно уменьшаясь при движении к Курильской глубоководной котловине, где земная кора сокращена до 20 км.

В средней части коры выделяются блоки фундамента с различными плотностными характеристиками. Западно-Лопатинское поднятие представлено корой континентального типа, оно максимально консолидировано со структурами суши, хотя и погребено под слоем осадков. В центральной части профиля в районе Нельминского прогиба, отделенного от структуры Западно-Лопатинского поднятия разломной зоной, фундамент уплотнен ($2.75\text{--}2.85\text{ г/см}^3$), а вулканогенно-осадочный слой разорван. Здесь, как уже отмечалось выше, наблюдается сокращение мощности земной коры, что свидетельствует о процессе рифтогенеза, в результате которого фундамент под данной структурой оказался сильно базифицирован и переработан. Юго-западная часть профиля представлена вулканическими возвышенностями Пионерским и Монеронским, фундамент которых имеет повышенную плотность $2.75\text{--}2.9\text{ г/см}^3$. Между Нельминским прогибом и вулканическими поднятиями на отметках профиля 60–120 км выделяется блок, являющийся северо-восточным продолжением Лопатинского поднятия, где плотностные характеристики фундамента имеют несколько пониженные значения ($2.7\text{--}2.8\text{ г/см}^3$) относительно соседних структур,

что позволяет сделать вывод, что в фундаменте данной структуры могут присутствовать породы сиалического ряда, а сама структура, вероятно, в геологическом прошлом составляла единое целое с континентом. Ранее похожее строение было выявлено в районе северо-восточного борта Тернейского прогиба, и сделан вывод, что рифтогенез на поздней стадии становления ЮТБ в северном направлении был менее активный, что не повлекло значительного сокращения мощности и полной базификации фундамента на данном участке (Прошкина и др., 2023).

Расчет кромок магнитоактивных тел, отмеченных на разрезе в виде заштрихованных областей (рис. 5), показал их приуроченность к зонам разломов и структурам вулканического происхождения. Так фланговые разломы Западно-Лопатинского поднятия, образованного позднепалеогеновым грано-диоритовым массивом, выходящим на дневную поверхность в районе мыса Золотого, представлены телами, неглубокого залегания с высокими значениями эффективной намагниченности порядка $0.5\text{--}0.9\text{ А/м}$. По всей видимости, данные тела представляют собой дайки, сформированные позднее становления гранодиоритового массива, и, судя по высоким параметрам намагниченности, сложенные породами преимущественно основного состава.

Монеронский блок ограничен разломными зонами, которые обозначены на геологической карте (Карта..., 1990) и довольно хорошо фиксируются в аномальных геофизических полях в виде областей высокого градиента. Расчет кромок для магнитных объектов показал, что источники магнитных аномалий приурочены к обозначенным зонам разломов, с глубиной залегания нижней кромки 16–19 км, что практически соответствует подошвенной части вулканического фундамента. При этом Монеронский блок находится в отрицательном магнитном поле (Жаров и др., 2004), что может свидетельствовать о более

раннем периоде его формирования относительно фланговых разломов, судя по всему, глубокого заложения, и являющихся каналами поставки магматического вещества в верхнюю кору.

Магнитное тело, отмеченное в пределах блока Пионерского поднятия, имеет явно вулканическую природу (Жаров и др., 2004) и может быть проинтерпретировано, как погребенная вулканическая постройка, формирование которой, скорее всего, связано с ранней стадией рифтинга в ЮТБ. Нужно отметить, что межбассейновое Пионерское поднятие, состоящее из цепи вулканических построек, образующих вытянутое в северо-восточном направлении подводное сооружение (Жаров и др., 2004), отделяет ЮТБ от ИЗСБ, куда входит Монеронский блок, ориентированный в меридиональном направлении. При этом большая часть структур, входящих в состав ИЗСБ, имеют также субмеридиональное направление (рис. 1), меняющееся на северо-восточное в области, граничащей с межбассейновым Пионерским поднятием, послужившим «барьером» для распространения активного рифтинга из центральной части Тернейского прогиба в пределы ИЗСБ. По всей видимости, вулканические процессы, происходившие на юго-восточной периферии ЮТБ, а также процессы, связанные с образованием Сахалино-Хоккайдской складчатой системы, оказали значительное влияние на формирование земной коры в пределах ИЗСБ и юго-западного шельфа о-ва Сахалин, переработав сиалическую кору и насытив фундамент структур более плотными и магнитными породами. Сеть тектонических разломов нижнекорового заложения, выявленных по геологическим данным и подтвержденных результатами нашего моделирования, а также расчетами глубин залегания кромок магнитоактивных тел, по нашему мнению, является главным источником сейсмоактивности, приуроченной к юго-западному шельфу Сахалина.

В центральной части модельного профиля выделяются два магнитных объекта, приуроченных к блокам редуцированной земной коры. Заштрихованное тело под Нельминской впадиной (рис. 5) соответствует области локализации сильно базифицированного фундамента, состав которого, по нашему мнению, определяется внедрением мантийного вещества и замещением пород сиалического ряда базитовым. Расчет верхней кромки данного объекта показал, что значительная его часть присутствует в слое осадков. Тело, локализованное между 104–117 км отметками (рис. 5), ограничивает блок на траверзе Лопатинского поднятия, где в фундаменте предполагается наличие остатков сиалической коры. По результатам расчетов глубины залегания кромок данного тела, оно проинтерпре-

тировано нами как приуроченное к разломной зоне, отделяющей данный блок от Пионерского поднятия. Глубина нижней кромки его юго-восточной части составляет 19 км, что ставит эту разломную зону в ранг глубинных. Одновременно здесь же отмечаются признаки вулканизма, не выраженного в поле силы тяжести (без изменения плотности) и в фундаменте структуры, но в вулканогенно-осадочном слое наблюдается локальная возвышенность, к которой приурочен магнитный объект, у которого глубина залегания нижней кромки северо-западной части составляет 9 км, что соответствует глубине кровли фундамента. Вероятно, что упомянутое тело может быть результатом внедрения магматического вещества по глубинному разлому на юго-восточном фланге структуры с формированием области покровного вулканизма.

Таким образом, проведенное моделирование показало, что переработанная сиалическая кора сосредоточена в центральной части разреза, при этом максимальной переработки подверглась кора, слагающая Нельминскую впадину, где процесс рифтогенеза проявился наиболее ярко. Учитывая, что данная структура имеет северо-восточное простирание, что соответствует направлению основного движения рифтинга, с которым связан основной этап формирования Татарского трога, то можно предполагать, что данная структура была сформирована раньше раскрытия центральной части ЮТБ, представленная Тернейским прогибом. Блоки Лопатинского и Западно-Лопатинского поднятий, в геологическом прошлом, вероятно, составлявшие единое целое с континентом, послужили препятствием, посредством которого северо-восточный рифтинг сменился на «веерообразный» (Чамов, Соколов, 2022), расколовший континентальный блок на несколько частей.

Учитывая ранее проведенные исследования (Прошкина и др., 2023, 2024) и выводы относительно формирования Тернейского прогиба, можно предположить, что на поздних этапах раскрытия центральной части ЮТБ направление основных осей изменилось с северо-восточного на субширотное. Активный рифтинг был сосредоточен в центральной части Тернейского прогиба, а сопровождавший вплоть до конца неогена начала четвертичного периода вулканизм затронул участки континентальной суши, образовав обширные поля платобазальтов (Кизинская и Совгаваньская свиты) на траверзе центральной части Тернейского прогиба (Карта..., 1994). В северном направлении активный рифтинг на поздних этапах не распространился, чему способствовал блок Красногорско-Ильинского межбассейнового поднятия. При этом неоген-четвертичный вулканизм в пределах континента

наиболее активно проявился в северном направлении, в то время как в пределах западного Сахалина севернее мыса Ламанон он затухал.

Сформировавшиеся структуры ИЗСБ не испытывали значительной тектонической перестройки на поздних этапах формирования ЮТБ, но вулканическая активность, полностью переработавшая сиалическую кору структур, по всей видимости, проявлялась здесь в течение всего кайнозоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование в южной части ЮТБ позволило выявить некоторые особенности глубинного строения земной коры этого важного с точки зрения эволюционного развития узлового района, переходящего к южному замыканию Татарского трога с Центральной котловиной Японского моря. В комплексе с расчетом глубины кромок магнитоактивных тел была проведена геологическая интерпретация полученной глубинной структурно-плотностной модели, на основании чего сделаны следующие выводы:

- в Нельминской впадине прослежена земная кора, подвергшаяся максимальной переработке и базификации, связанные с началом активного рифтогенеза (ранний палеоген) северо-восточного направления. Ограниченность данной зоны по ширине, относительно центральной части ЮТБ, представленного Тернейским прогибом, дает основание предполагать, что поздний этап становления ЮТБ (поздний неоген-четвертичный период) практически не затронул его южный борт, однако процесс вулканизма охватил практически всю его периферию, включая континентальные и островные структуры;

- выявлены признаки сиалической коры на траверзе Лопатинского поднятия, что позволило сделать вывод о единстве данной структуры с континентом в геологическом прошлом. Расчет глубины кромок магнитных объектов показал, что разлом, отделяющий данную структуру от Пионерского поднятия, имеет нижнекоровое заложение и является каналом поставки магматического вещества к верхней коре, слагающей блок Лопатинского поднятия, где обнаружены признаки вулканизма;

- результатами моделирования подтверждено вулканическое происхождение структур в ИЗСБ, в частности, в пределах Пионерского поднятия выявлено конусообразное магнитное тело, интерпретируемое, как погребенная вулканическая постройка;

- уточнено положение и глубина проникновения основных разломов, а также приуроченность магнитных объектов к некоторым из них;

Таким образом, проведенное исследование выявило новые особенности глубинного стро-

ения южной части ЮТБ, позволившие сделать выводы относительно формирования этого узлового района, где происходит стыковка разнонаправленных тектонических структур: Южно-Татарского, Иссикари-Западно-Сахалинского бассейнов и южной части Татарского трога. Рифтинговый процесс на ранних этапах становления Татарского трога (период раннего палеогена), протекающий в северо-восточном направлении из центральной части Японского моря, не привел к полной деструкции мощной континентальной коры в районе южной части Южно-Татарского бассейна, раздробив ее фундамент на отдельные блоки и частично заместив сиалический фундамент более основными породами. При этом северо-восточное направление рифтинга сменилось на «веерообразное», что привело к расколу земной коры в нескольких направлениях от северо-восточного до субширотного в центральной части ЮТБ. Здесь интенсивный рифтинг протекал вплоть до четвертичного периода, что привело к максимальной переработке земной коры в этой части Татарского трога и активным вулканическим процессам на его периферии. По всей видимости, в северном направлении процесс рифтинга из центральной части ЮТБ не распространился, чему способствовал мощный континентальный блок межбассейнового Красногорско-Ильинского поднятия (Прошкина и др. 2023, 2024), а поздннеогеновый вулканизм сместился в сторону континента.

Работа выполнена в рамках Федеральной госбюджетной темы: «Изучение структуры, физических и вещественных характеристик и геодинамики литосферы, сейсмической активности и закономерностей размещения полезных ископаемых в регионе дальневосточных морей и северо-западном секторе Тихого океана», регистрационный номер: 124022100082-4.

Список литературы [Reference]

- Белоусов В.В., Павленкова Н.И.* Типы земной коры // Геотектоника. 1985. № 1. С. 3–14 [*Belousov V.V., Pavlenkova N.I.* Typy zemnoi kory // *Geotectonika*. 1985. № 1. P. 3–14 (in Russian)].
- Булина Л.В.* Об использовании материалов аэромагнитной съемки при изучении глубинного строения земной коры // Советская ГЕОЛОГИЯ. 1961. № 5 С. 134–138 [*Bulina L.V.* Ob ispolzovanii materialov aeromagnetnoi s`yomki pri izuchenii glubinnoogo stroeniya zemnoy kory // *Sovetskaya Geologiya*. 1961. № 5. P. 134–138 (in Russian)].
- Валитов М.Г., Ли Н.С., Сергеев А.Ф. и др.* Экспедиционные исследования в Японском и Охотском морях в 55-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Опарин» // Океанология. 2020а. Т. 60. Вып. 1. С. 165–168. <https://doi.org/10.31857/S0030157420010244> [*Valitov M.G., Lee N.S., Sergeev A.F. et al.* Integrated expeditionary

- research in the Sea of Japan and the sea of Okhotsk on cruise № 55 of the R/V «Akademik Oparin» // Oceanology. 2020a. V. 60. Iss. 1. P. 145–147. <https://doi.org/10.1134/S0001437020010245>].
- Валитов М.Г., Ли Н.С., Яцук А.В. и др.* Комплексные геолого-геофизические и океанографические исследования в Японском море и Татарском проливе (85-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев» // Тихоокеанская геология. 2020б. Т. 39. № 3 С. 104–109. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2020-39-3-104-109> [Valitov M.G., Lee N.S., Yatsuk A.V. et al. Integrated Geological-Geophysical, Gas-Geochemical and Oceanographic Research in the Sea of Japan and the Tatar Strait during the 85th Cruise of the R/V «Akademik M. A. Lavrentyev» // Russian Journal of Pacific Geology. 2020b. V. 14. №. 6. P. 586–590. <https://doi.org/10.1134/S1819714020060093>].
- Валитов М.Г., Шакиров Р.Б., Яцук А.В. и др.* Комплексная геолого-геофизическая экспедиция на научно-исследовательском судне «Академик Опарин» в Татарском проливе Японского моря (рейс № 54, 2017 г.) // Океанология. 2019а. Т. 59. Вып 2. С. 311–314. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574592311-314> [Valitov M.G., Shakirov R.B., Yatsuk A.V. et al. Integrated Geological and Geophysical Expedition aboard the R/V «Akademik Oparin» to the Tatar Strait, Sea of Japan (Cruise 54, 2017) // Oceanology. 2019a. V. 59. Iss. 2. P. 283–286. <https://doi.org/10.1134/S0001437019020188>].
- Валитов М.Г., Шакиров Р.Б., Яцук А.В. и др.* Комплексные геолого-геофизические, газогеохимические и океанографические исследования в Японском море и Татарском проливе в 81-ом рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» // Тихоокеанская геология. 2019б. Т. 38. № 4. С. 97–105. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2019-38-4-97-105> [Valitov M.G., Shakirov R.B., Yatsuk A.V. et al. Integrated geological-geophysical, gas-geochemical and oceanographic studies in the Sea of Japan and the Tatar Strait in the 81st voyage of the R/V «Akademik M. A. Lavrentiev» // Tikhookeanskaya Geologiya. 2019b. V. 38. № 4. P. 97–105. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2019-38-4-97-105> (in Russian)].
- Гладкий К.В.* Гравиразведка и магниторазведка. М.: Недра, 1990. 607 с. [Gladkii K.V. Gravitrazvedka i magnitorazvedka. Moscow: Nedra, 1990. 607 p. (in Russian)].
- Глубинное сейсмическое зондирование земной коры Сахалино-Хоккайдо-Приморской зоны / Ред. С.М. Зверев, Ю.В. Тулина. М.: Наука, 1971. 285 с. [Glubinnoe seismicheskoe zondirovanie zemnoi kory Sakhalino-Hokkaido-Primorskoj zony / Red. S.M. Zverev, Y.V. Tulina. M.: Nauka, 1971. 285 p. (in Russian)].
- Гравиразведка: Справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецов. М.: Недра, 1981. 397 с. [Gravitrazvedka: spravochnik Geophysika / Pod red. E.A. Mudretsovoi. Moscow: Nedra, 1981. 397 p. (in Russian)].
- Жаров А.Э.* Рифтогенная система Татарского пролива и ее значение для прогноза нефтегазоносности Западного Сахалина // Проблемы развития и освоения минерально-сырьевой базы Сахалинской области. Южно-Сахалинск, 2002. С. 28–34 [Zharov A.E. Riftogennaya sistema Tatarskogo proliva i eyo znachenie dlya prognoza neftegazonosnosti Zapadnogo Sakhalina // Problemy razvitiya i osvoeniya mineralno-syr'evoi basy Sakhalinskoi oblasti. Yuzhno-Sakhalinsk, 2002. P. 28–34 (in Russian)].
- Жаров А.Э., Кириллова Г.Л., Маргулис Л.С. и др.* Геология, геодинамика и перспективы нефтегазоносности осадочных бассейнов Татарского пролива. Владивосток: ДВО РАН, 2004. 220 с. [Zharov A.E., Kirillova G.L., Margulis L.S. et al. Geology, geodynamics and petroliferous potential of the sedimentary basins of the Tatar Strait. Vladivostok: FEB RAS, 2004. 220 p. (in Russian)].
- Злобин Т.К.* Строение земной коры, поле тектонических напряжений и грязевой вулканизм Сахалино-Курильского региона / Т.К. Злобин, В.В. Ершов, А.Ю. Полец. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 176 с. [Zlobin T.K. Stroenie zemnoi kory, pole tektonicheskikh napryazhenii i gryazevoi volcanism Sakhalino-Kuril'skogo regiona / T.K. Zlobin, V.V. Ershov, A.Y. Polets. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhGU, 2012. 176 p. (in Russian)].
- Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., Полец А.Ю.* Глубинное строение и сейсмоструктура южной части Охотоморского региона (по профилю южный Сахалин — южные Курилы) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 2. С. 46–57 [Zlobin T.K., Poplavskaya L.N., Polets A.Y. Deep structure and seismotectonics of the Southern sea of Okhotsk region (along a profile from Southern Sakhalin to the Southern Kuril islands) // Russian Journal of Pacific Geology. 2011. V. 5. № 2. P. 129–138. <https://doi.org/10.1134/S1819714011020084>].
- Знаменский В.В.* Полевая геофизика. М.: Недра, 1980. 351 с. [Znamensky V.V. Poleyaya geofizika. Moscow: Nedra, 1980. 351 p. (in Russian)].
- Карта дочетвертичных образований: L-(54),(55); K-(55). Государственная геологическая карта СССР (Южно-Сахалинск). Масштаб: 1:1000000. Составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1990 / редактор: Ротман В.К. [Map of prequaternary formations: L-(54),(55); K-(55). State Geological Map of the USSR (Yuzhno-Sakhalinsk). Scale: 1:1000000. Compiled by: FGBU «VSEGEI», 1990 / Editor: V.K. Rotman (in Russian)].
- Карта дочетвертичных отложений: L-(53)(54) (Кавалерово). Государственная геологическая карта СССР. Дальневосточная серия. Масштаб: 1:1000000. Составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1994 / Редактор: Р.И. Соколов [Map of prequaternary deposits: L-(53)(54) (Kavalerovo). State Geological Map of the USSR. Far Eastern series. Scale: 1:1000000. Compiled by: FGBU «VSEGEI», 1994 / editor: R.I. Sokolov (in Russian)].
- Колпашникова Т.Н.* Программа моделирования магнитного, гравитационного полей и некоторых их производных / А. с. Российская Федерация № 200761354; заявл. 25.06.07; опубл. 21.08.07. Бюл. программы для ЭВМ, базы данных № 3, 2007 [Kolpashchikova T.N. Program for modeling of magnetic, gravitational fields and some of their derivatives / A. s. Russian Federation № 200761354; avv. 25.06.07; published 21.08.07. Bul. computer programs, data bases № 3, 2007 (in Russian)].
- Левин Б.В.* Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин. М.: Янус-К, 2009. 204 с. [Levin B.V. The 2 august 2007 Nevelsk earthquake and tsunami, Sakhalin island. Moscow: Janus-K, 2009. 204 p. (in Russian)].
- Логачев А.А., Захаров В.П.* Магниторазведка. М.: Недра, 1973. 352с. [Logachev A.A., Zakharov V.P. Magnitorazvedka. Moscow: Nedra, 1973. 352 p. (in Russian)].

- Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н., Сеначин В.Н.* К строению Татарского трога (Японское море): новые подходы // Геология и полезные ископаемые мирового океана. 2010. № 3 (21). С. 65–75 [*Lomtev V.L., Patrikeev V.N., Senachin V.N.* K stroeniyu Tatarskogo troga (Yaponskoe more): novye podhody // Geologiya i poleznye iskopaemye mirovogo okeana. 2010. № 3 (21). P. 65–75 (in Russian)].
- Магниторазведка: Справочник геофизика / Под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. М.: Недра, 1980. 367 с. [Magnitorazvedka: Spravochnik geofizika / Pod red. V.E. Nikitsky, Y.S. Glebovsky. Moscow: Nedra, 1980. 367 p. (in Russian)].
- Никифоров В.М., Кулинич Р.Г., Валитов М.Г. и др.* Особенности флюидного режима литосферы в зоне сочленения Южного Приморья и Японского моря по комплексу геофизических данных // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 1. С. 54–64 [*Nikiforov V.M., Kulinich R.G., Valitov M.G. et al.* Peculiarities of the fluid regime in the lithosphere of the junction zone between South Primorye and the Sea of Japan from the comprehensive geophysical data // Russian Journal of Pacific Geology. 2013. V. 7. № 1. P. 46–55. <https://doi.org/10.1134/S1819714013010065>].
- Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Сигеев И.А.* Структурно-плотностная модель земной коры западного шельфа о-ва Сахалин и ее геологическая интерпретация // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43. № 4. С. 39–50. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2024-43-4-39-50> [*Proshkina Z.N., Valitov M.G., and Sigeev I.A.* Structural-Density Model of the Earth's Crust within the Sakhalin Western Shelf and Its Geological Interpretation // Russian Journal of Pacific Geology. 2024. V. 18. № 4. P. 373–382. <https://doi.org/10.1134/S1819714024700106>].
- Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Телегин Ю.А. и др.* Глубинное строение земной коры южной части Татарского трога и распределение газогеохимических аномалий // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 2. С. 36–49. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-2-36-49> [*Proshkina Z.N., Valitov M.G., Telegin YU.A. et al.* The deep crustal structure in the southern part of the Tatar trough and the distribution of gas-geochemical anomalies // Russian journal of Pacific geology. 2023. V. 17. № 2. P. 134–146. <https://doi.org/10.1134/S1819714023020057>].
- Пятницкий В.К.* Определение глубин залегания намагниченных тел по характерным точкам кривой или ΔТ // Труды Института Геологии и Геофизики СО АН СССР. 1960. Вып. 1. С. 38–52 [*Pyatnitsky V.K.* Opredeleniye glubiny zaleganiya namagnichennykh tel po harakternym tochkam krivoi ili ΔT // Trudy Instituta Geologii i Geophiziki SO AN SSSR. 1960. Iss. 1. P. 38–52 (in Russian)].
- Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пуйн В.Б. и др.* Геотраверс региона Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2005. № 5. С. 45–58 [*Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B. et al.* The Okhotsk sea Geotraverse // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2005. № 5. P. 45–58 (in Russian)].
- Тараканов Р.З., Андреева М.Ю.* Роль сейсмофокальной зоны в формировании и развитии структур Курило-Охотского региона // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 6. С. 87–96 [*Tarakanov R.Z., Andreeva M.Yu.* Role of the seismic focal zone in the formation and development of the Kuril-the sea of Okhotsk region structures // Tikhookeanskaya Geologiya. 2012. V. 31. № 6. P. 87–96 (in Russian)].
- Чамов Н.П., Соколов С.Ю.* Рифтогенез в Арктике: процессы, тренд эволюции и генерация углеводородов // Литология и полезные ископаемые. 2022. Т. 57. № 2. С. 95–120. <https://doi.org/10.1134/S0024490222020031> [*Chamov N.P., Sokolov S.Y.* Riftogenesis in the arctic: processes, evolution trend, and hydrocarbon generation // Lithology and Mineral Resources. 2022. V. 57. № 2. P. 95–120. <https://doi.org/10.1134/S0024490222020031>]. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/> (Дата обращения 16.05.2024)
- Wei D., Seno T.* Determination of the Amurian plate motion // Mantle dynamics and plate interaction in East Asia / Eds. M. Flower, S. Chung, C. Lo, T. Lee, 1998. P. 337–346.

DEEP STRUCTURE AND SOURCES OF MAGNETIC ANOMALIES IN THE SOUTH TATAR BASIN (TATAR STRAIT, JAPANESE SEA)

Z.N. Proshkina, M.G. Valitov, I.A. Sigeev

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690041; e-mail: pro-zo@yandex.ru

Received August 02, 2024; revised November 05, 2024; accepted December 25, 2024

The results of structural-density modeling along the profile crossing structures in the southern part of the South Tatar basin located in the Tatar Strait in the north of the Sea of Japan are presented. The purpose of the modeling was to study the deep structure of the area and compare it with the structure of the previously studied central part of the basin. The depths of the upper and lower edges of the magnetized objects were calculated using the tangent method. The structural-density section of the Earth's crust demonstrates the block structure of the basement and, possibly, its differentiation by composition. Calculation of the depth of the edges of magnetically active bodies showed their confinement to the upper crust, mainly to fault zones and volcanic structures. In the central part of the section, altered continental crust with signs of basification was revealed.

Keywords: structural-density modeling, magnetically active objects, deep structure, rifting.