

УДК 550.3/551.1

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЛЬЕФА, ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ И АНОМАЛИЙ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

Е.И. Есин<sup>1,2</sup>, А.Н. Василевский<sup>1,2</sup>, Н.А. Бушенкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

Различные подходы к тектоническому районированию и разные типы (комплексы) используемых данных, на базе которых районирование производится, являются множественностью прежде полученных различными авторами тектонических схем Камчатки и Камчатского региона. В данной работе для изучения пространственных связей тектонических проявлений геологических процессов использовался совместный анализ аномалий гравитационного поля, трансформант гравитационного поля и рельефа, магнитного поля и современных сейсмотомографических моделей аномалий скоростей. В результате проведенного исследования была построена тектоническая схема линейно-блокового типа. Полученные линейные структурные элементы хорошо согласуются с данными потенциальных полей, сейсмическими построениями и ранее опубликованными материалами. Показана продуктивность приведенного способа комплексного анализа геофизических полей для выявления их пространственных связей и блоковых структур среды, которые могут послужить основой для конструирования пространственных ограничений для источников гравитационного поля при решении обратных задач, задач разделения потенциальных полей и их углубленной геологической интерпретации.

*Тектонические структуры, гравитационная аномалия Буге, аномальное магнитное поле, сейсмическая томография, аномалии скоростей сейсмических волн, функция двумерного лапласиана, вертикальная производная гравитационного поля, винеровская фильтрация*

## SPATIAL CORRELATIONS BETWEEN THE TERRAIN FEATURES, GRAVITATIONAL FIELD AND SEISMIC VELOCITY ANOMALIES IN THE CENTRAL KAMCHATKA REGION

E.I. Esin, A.N. Vasilevskiy, N.A. Bushenkova

Different approaches to tectonic zoning and different types (complexes) of used data, on the basis of which the zoning is performed, cause the plurality of tectonic schemes of Kamchatka and the Kamchatka region previously obtained by different authors. In this work, a joint analysis of gravity field anomalies, gravity field and relief transforms, magnetic field and modern seismotomographic models of velocity anomalies was used to study spatial relationships of tectonic manifestations of geological processes. As a result of this study, a linear-block type tectonic scheme was constructed. The obtained linear structural elements are in good agreement with the data of potential fields, results and previously published materials. The productivity of the presented method of complex analysis of geophysical fields for revealing their spatial relations and block structures of the environment is shown. The analysis outcomes can be used to establish spatial constraints for gravity field sources when solving inverse problems, potential field separation problems and their detailed geological interpretation.

*Tectonic structures, Bouguer gravity anomaly, anomalous magnetic field, seismic tomography, seismic wave velocity anomalies, two-dimensional Laplacian function, vertical derivative of gravity field, Wiener filtering*

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, связанные с интерпретацией данных крупных геологических образований, являются всегда актуальными, особенно в таких сложных районах, как Камчатский полуостров. У гравитационного метода есть неоспоримое преимущество в вопросах разрешения споров между различными геолого-тектоническими или геофизическими концепциями относительно строения или истории развития региона — гравитационное поле непосредственно связано с пространственным распределением плотности, которая напрямую зависит от вещественного состава и термодинамического состояния среды. Для исследования геодинамически сложных областей большое значение имеет возможность разделения полей, характеризующихся структурами и объектами разного масштаба. Это приводит к задаче отделения полей относительно малоамплитудного влияния крупных региональных и глобальных структур от

полей источников малоглубинного гравиактивного слоя. Одним из этапов подобного разделения можно считать построение тектонической схемы исследуемой области, включающей блоковую структуру района. Такая схема помогает устанавливать пространственные связи аномалий физических свойств гетерогенной среды, которые могут послужить основой для реализации разделения потенциальных полей (при помощи концептуальных моделей среды) и их геологической интерпретации. В статье наибольшее внимание уделяется вопросам построения линейной структуры района, нарушенной поперечными разломами, на основе комплекса геофизических данных.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полуостров Камчатка — часть активной Курило-Камчатской островодужной системы, протягивающейся на 2000 км от Японии на юге до соединения с Алеутской дугой на севере. Современное единство этой системы проявляется в непрерывном глубоководном желобе, сейсмофокальной зоне и поясе активного вулканизма. В то же время Курильская островная дуга существует начиная с олигоцена [Lander, Shapiro, 2007], а современная структура Камчатки приобрела свой облик лишь в последние миллионы лет [Селиверстов, 2009], причем некоторые специфические черты структурного рисунка возникли в четвертичное время [Lander, Shapiro, 2007].

Ключевым элементом тектонической структуры п-ова Камчатка является существование трех вулканических фронтов — западного, восточного и южного. Южный вулканический островодужный фронт не рассматривается в работе, так как географически не попадает в область исследования данной работы. Западный вулканический фронт (ЗВФ), часто именуемый «Центральным» или «Срединым», практически не активный в настоящее время. Связанные с ним вулканические формации простираются вдоль большей части полуострова. Восточный вулканический фронт (ВВФ), активный в настоящее время, протянулся вдоль восточного побережья от южной оконечности Камчатки до соединения с Алеутской дугой на ~56° с.ш. Между этими двумя областями с горным рельефом расположена Центрально-Камчатская депрессия (ЦКД), в северной части которой (55—57° с.ш.) находится кластер чрезвычайно активных вулканов [Iwasaki et al., 2013].

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Изучению тектонической структуры Камчатки и Камчатского региона посвящено множество исследований разного масштаба [Levin et al., 2002; Авдейко и др., 2003; Avdeiko et al., 2007; Апрелков, Попруженко, 2009; Селиверстов, 2009; Яроцкий, 2014; Кожурин, 2019]. Ввиду различных подходов к тектоническому районированию и разных видов используемых данных, на базе которых районирование производится, получаются результаты, отличные друг от друга. В данной работе для изучения пространственных связей тектонических проявлений геологических процессов использовались технологии совместного анализа структуры гравитационного поля и поверхности дневного рельефа, ранее примененные для изучения неоген-четвертичных структур областей постглациальных поднятий [Добрецов, Васильевский, 2019] при интерпретации структуры Камчатского желоба и Тихоокеанской плиты (рис. 1) [Добрецов, Васильевский, 2018]. В последней работе данные потенциальных полей и особенностей рельефа позволили получить объективную картину с равной плотностью информации о структуре континентальных и подводных сегментов территории, поскольку спутниковые данные не различаются по объективности и детальности на суше и в акваториях, что также важно и для пограничных зон суши—море.

### Вычисление трансформант потенциальных полей и высот рельефа

В качестве исходных данных для решения поставленной задачи построения варианта тектонической схемы были использованы данные гравитационного поля в двух редукциях, аномального магнитного поля и рельефа дневной поверхности. Гравитационные аномалии Буге (в предположении стандартной плотности промежуточного слоя 2.67 г/см<sup>3</sup>) рассчитаны с помощью интернет-сайта ICGEM (<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>) по модели гравитационного поля EIGEN-6C4 [Förste et al., 2015]. Эта модель поля считается достаточно качественной и многократно проверенной, ее пространственное разрешение около 9 км. Аномалии в редукции в свободном воздухе взяты из одноминутной сетки «морской» модели DTU15 [Andersen, Knudsen, 2016], ее пространственное разрешение около 7—9 км. Эта модель также многократно использовалась в тектонических интерпретациях и является предпочтительной ввиду близости исследуемой области к акваториям. Однако для вычисления вертикальных производных гравитационного поля (аномалий в редукции в свободном воздухе) мы использовали более новую экспериментальную глобальную модель XGM2019, отличия которой от модели EIGEN-6C4 на изучаемой территории незначительны, но коэффициенты Стокса определены более точно, что гарантирует более точный расчет пространственных производных [Zingerle et al., 2020]. Данные о рельефе были получены из базы данных сайта GMRT (<https://www.gmrt.org>) (рис. 2). В качестве данных магнитного поля использу-

**Рис. 1. Карта рельефа Камчатского края (вверху) и его трансформанта (внизу) с изображением гравитационных аномалий (вторичные производные гравитационного поля). На карте обозначены: 1 — положение края субдуцирующей плиты от сочленения с Алеутским желобом на глубине 200 км; 2 — контур предполагаемого края плиты на той же глубине, оторвавшегося около 10 млн л. н. [Добречев, Васильевский, 2018].**

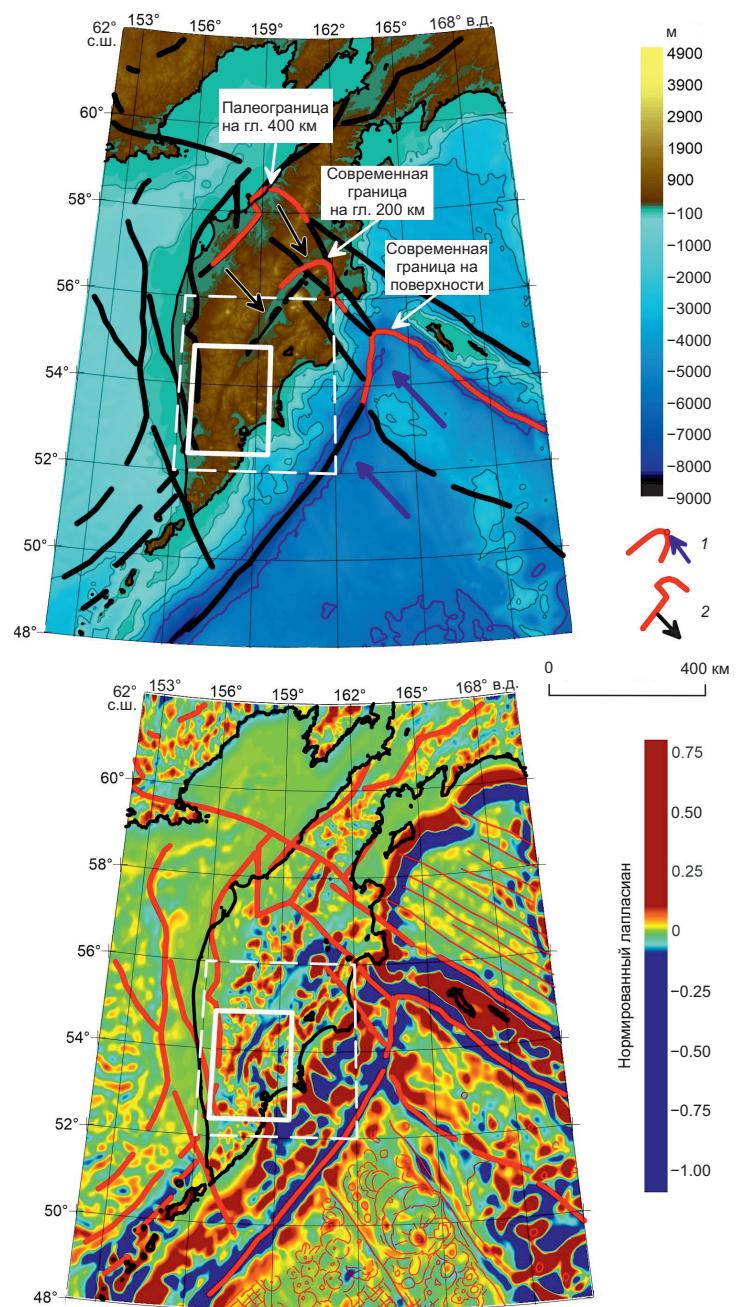
1 — положение края субдуцирующей плиты от сочленения с Алеутским желобом на глубине 200 км; 2 — контур предполагаемого края плиты на той же глубине, оторвавшегося около 10 млн л. н. [Добречев, Васильевский, 2018].

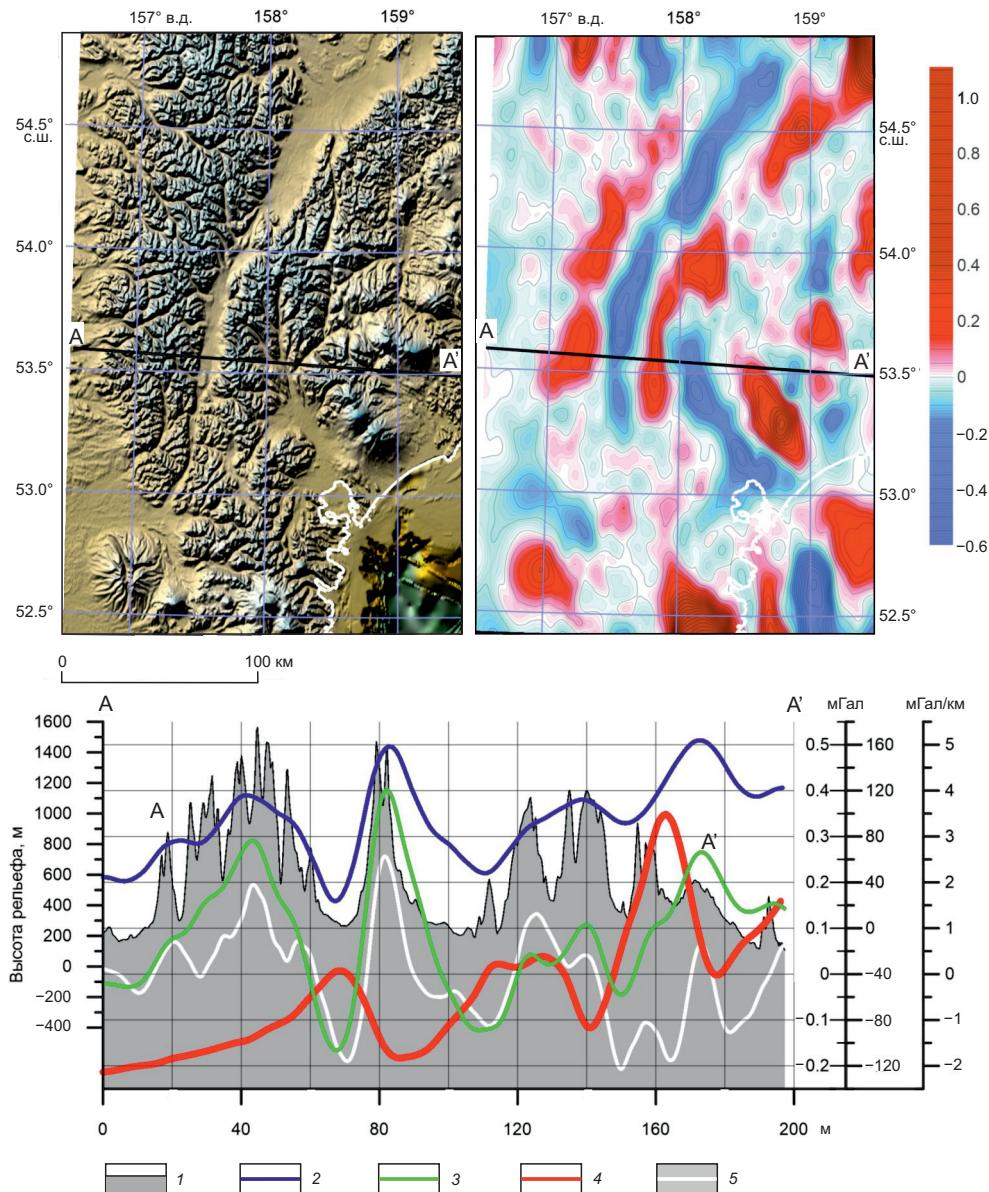
зовалось поле глобальной модели литосферных магнитных аномалий EMAG2 v.3 (<https://data.nodc.noaa.gov>) с детальностью две угловые минуты (примерно 3.5 км). Для построения линейных элементов структуры ключевую роль играл анализ карт трансформант потенциальных полей и рельефа.

#### Пространственные производные

гравитационного поля довольно широко используются при районировании потенциальных полей и выявлении их особенностей. Для расчета необходимых нам вертикальных производных мы использовали аналитическую 3D модель (сферическое гармоническое разложение) аномального гравитационного поля (в свободном воздухе) и сервис сайта ICGEM. Чтобы подавить локальные аномалии, расчет был выполнен на высоте 8 км, что обусловило необходимую степень генерализации поля при достаточной четкости выделения его особенностей.

**Двумерный лапласиан.** Для тонкого анализа локальных и региональных особенностей применялась техника вычисления двумерного лапласиана (дивергенции латеральных градиентов высот/глубин) в скользящем окне заданного радиуса. 2D лапласиан широко используется для обнаружения краев объектов при машинной обработке изображений [Хорн, 1989; Savant, 2016]. Выделяемые края объекта, обозначая границу между двумя однородными областями полезны для сегментации исследуемого поля. Метод можно применять к другим измерениям, таким как топографические высоты или потенциальные поля [Добречев, Васильевский, 2018]. Широкое применение этот метод нашел при прогнозе заложения нефтедобывающих скважин [Глухманчук, Васильевский, 2013], выявляя малоамплитудные деформационные структуры пластов и сейсмических границ, включая сдвиговые. Достоверность выделяемых с его помощью блоковых структур контролировалась независимым методом — построением разрывных нарушений по дифракции сейсмических волн, видимых на необработанных сейсмических разрезах. Таким образом выделялись структуры разрушения (в том числе разломы), к которым были приурочены зоны высокой проницаемости, и, таким образом, — зоны эффективной добычи углеводородов. Почти стопроцентный успех в заложении высокодебитных скважин являлся еще одним весомым свидетельством объективности этого метода при выделении тектонических блоковых структур. Стоит отметить, что конкурирующая техника выделения разломов по полю градиентов рельефа сейсмических горизонтов давала нулевую эффективность для выделения искомых зон разрушения.





**Рис. 2. Сопоставление особенностей разных трансформант гравитационного поля и рельефа.**

Вверху — рельеф и его двумерный лапласиан; внизу — сопоставление подчеркиваемых особенностей для разных трансформант гравитационного поля и двумерного лапласиана рельефа (правая ось — вертикальный градиент аномалий Фая (мГал/км), левее — составная ось: левая шкала — нормированный лапласиан (безразмерный), правая — аномалии Фая и Буге (мГал)).

1 — рельеф, 2 — аномалии Фая, 3 — вертикальный градиент аномалии Фая, 4 — аномалии Буге, 5 — нормированный лапласиан.

Необходимо уточнить, что использовать двумерный лапласиан для анализа рельефа дневной поверхности в целях изучения тектоники района следует с осторожностью, поскольку денудационные процессы могут существенно исказить картину выявленных особенностей. Но, с другой стороны, интенсивность процессов денудации может коррелировать с тектоникой (и разломной структурой).

Радиус окна вычисления лапласиана задавался исходя их анализа периодограмм среднеквадратических амплитуд трансформированного поля, определяя таким образом масштаб неоднородностей поверхности и характеристики периодичности изменения геометрии данных карт. Подобной трансформации подвергались данные гравитационного, магнитного полей и рельефа дневной поверхности. Для облегчения анализа пространственного распределения полученной трансформанты, рассчитанные значения нормировались на максимальные (по абсолютной величине) в области исследования.

**Пространственная частотная фильтрация.** Последним элементом стал анализ карты компоненты гравитационного поля, которая не связана с рельефом местности. Для ее выделения использовалась

винеровская фильтрация двумерного спектра, полученного с помощью  $F$ -аппроксимации [Керимов, 2003, 2009, 2011a, 2011b, 2015, 2020; Керимов и др., 2018]. Данный метод линейных интегральных представлений позволяет создать единую непротиворечивую гармоническую модель гравитационного поля  $\frac{\partial W_a(\mathbf{M})}{\partial x_3}$  (первой вертикальной производной гравитационного потенциала), гармонического в полу-пространстве  $x_3^i > -H$ , представив ее через спектр Фурье  $F(u, v)$  (1—2):

$$\frac{\partial W_a(\mathbf{M})}{\partial x_3} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(u, v; x_3^i + H) \left( F(u, v) \exp\left(-i(u x_1^i + v x_2^i)\right) \right) du dv, \quad (1)$$

$$K(u, v; x_3^i + H) = \sqrt{u^2 + v^2} \exp\left(-\left(x_3^i + H\right) \sqrt{u^2 + v^2}\right), \quad (2)$$

где  $W_a(\mathbf{M})$  — аномальный потенциал, измеренный в точке  $\mathbf{M} = (x_1^i, x_2^i, x_3^i)$ ,  $u, v$  — множество, задающее распределение двумерного спектра Фурье (обратные длины),  $F(u, v)$  — непрерывный двумерный спектр Фурье,  $H$  — характеристика (высота) полупространства представимости интеграла Фурье,  $K(u, v; x_3^i + H)$  — частотная характеристика, позволяющая отобразить разновысотные измерения в едином двумерном Фурье изображении.

Для фильтрации в качестве входных данных использовалась сферическая аппроксимация модели XGM2019 и моделированное поле рельефа. Моделирование поля рельефа производилось на высоте 4 км через численное интегрирование формулы однородного пласта [Мартышко и др., 2016]:

$$\Delta g(\mathbf{M}) = f \sum_{i=0}^N \sigma \left( \frac{1}{\sqrt{(x - \xi_i)^2 + (y - \zeta_i)^2 + (z - h_i)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x - \xi_i)^2 + (y - \zeta_i)^2 + z^2}} \right) \Delta \xi_i, \Delta \zeta_i, \Delta h_i, \quad (3)$$

где  $\mathbf{M} = (x, y, z)$  — координата точки расчета поля  $\Delta g$ ;  $(\xi_i, \zeta_i)$  — координаты центра  $i$ -й ячейки;  $h_i$  — высота рельефа;  $f$  — гравитационная постоянная;  $\Delta \xi_i, \Delta \zeta_i$  — площадь элементарной площадки рельефа;  $\sigma$  — плотность рельефа.

В данной постановке поле состоит из суммы полей целевого объекта — компоненты поля, которая коррелирует с рельефом, и поля помехи (части, некоррелирующей с рельефом). Для фильтрации полезной части поля необходимо знать спектр суммарного поля и спектр поля концептуальной модели, которые получены с использованием метода линейных интегральных представлений  $F$ -аппроксимации. Это позволяет восстановить аппроксимационное значение действительной и мнимой частей непрерывного спектра в любой заданной области частот  $(u, v)$  для последующего интегрирования. Рассмотрим некоторую заданную дискретную сеть в спектральной области, и пусть  $|F_s(i, j)|^2$  — значение спектра мощности суммарного поля на частоте  $(u_i, v_j)$ , а  $|U_{os}(i, j)|^2$  — спектр мощности концептуальной модели на частоте  $(u_i, v_j)$ . При этих условиях фильтр Винера рассчитывается по формуле [Кокошкин и др., 2015] (4):

$$F_V(i, j) = \frac{|U_{os}(i, j)|^2}{|U_{os}(i, j)|^2 + (|F_s(i, j)| - |U_{os}(i, j)|)^2}, \quad (4)$$

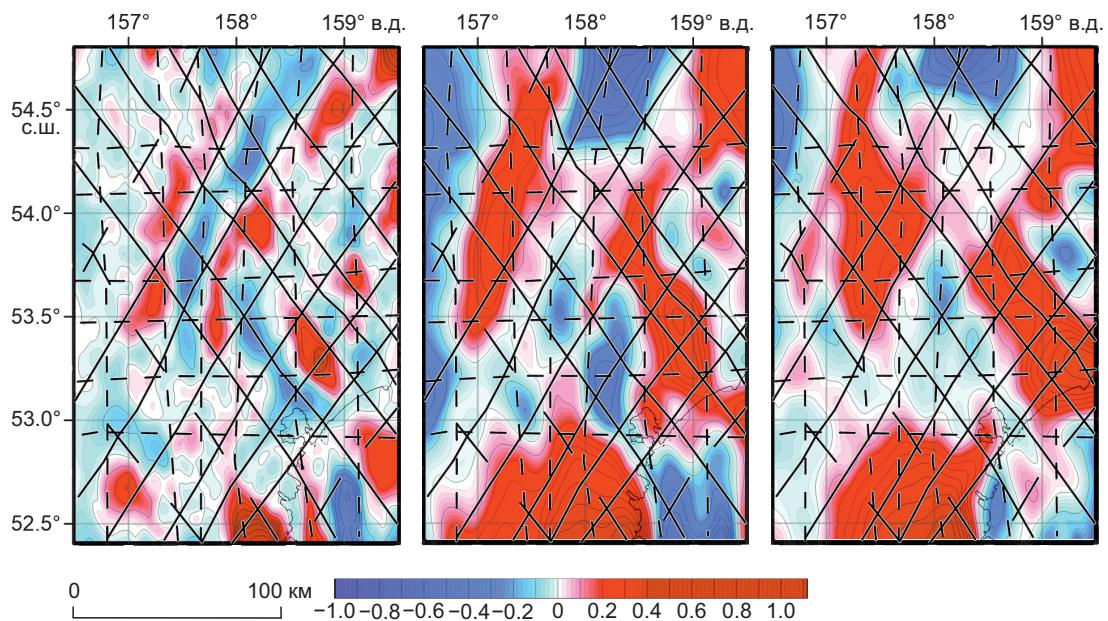
где  $(|F_s(i, j)| - |U_{os}(i, j)|)^2$  — оценка мощности шума (помехи).

Процесс получения спектра очищенного сигнала  $F_v(i, j)$  в точке спектральной области  $(u_i, v_j)$  можно представить в виде:

$$F_v(i, j) = F_V(i, j) F_s(i, j). \quad (5)$$

### Синтез линейно-блоковой структурной модели

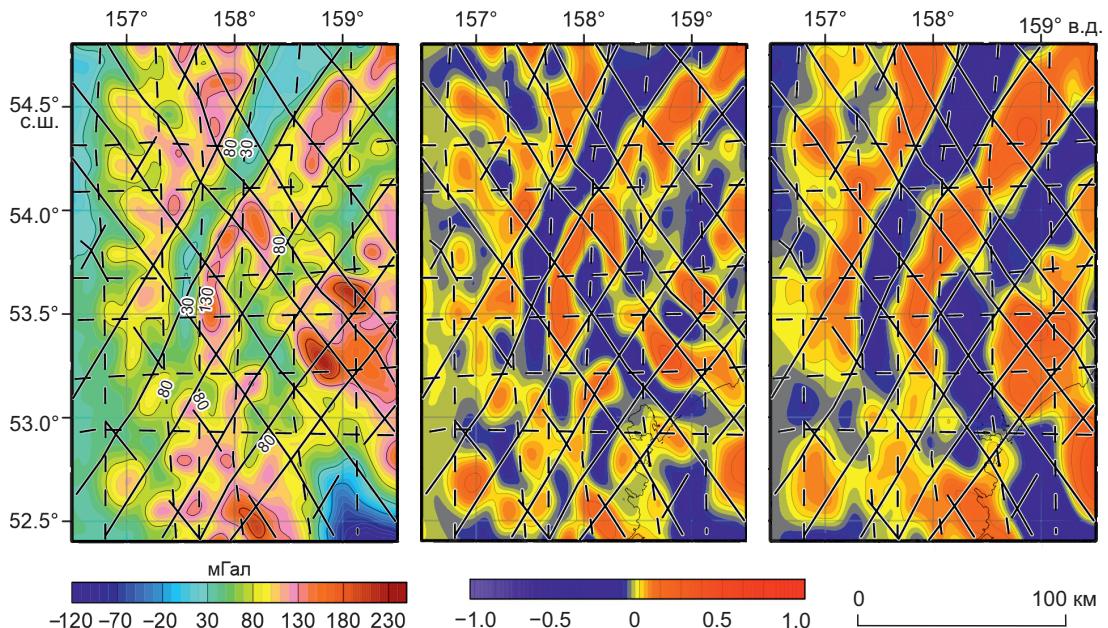
Принятая нами технология получения структурной модели основана на комплексировании гравитационных и магнитных полей и их трансформант, а также трансформант дневного рельефа методом сопоставления (картографического наложения [Долгаль, 2012]) всей совокупности данных, включая их корреляционные взаимосвязи, определенные численно [Никитин, Хмелевской, 2004; Долгаль, 2012].



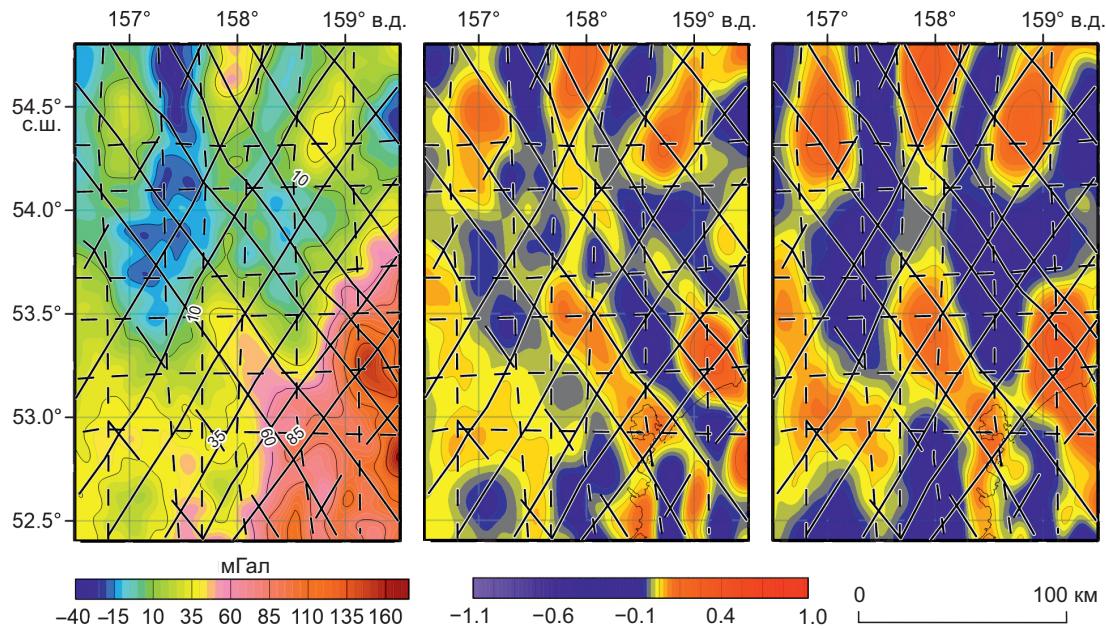
**Рис. 3. Двумерный нормированный лапласиан и построенная блоковая схема.**

Цветовым кодом изображена функция лапласиана, рассчитанная при радиусах окна 25, 42 и 70 км (слева направо); сплошными и штриховыми черными линиями обозначена блоковая схема.

С помощью функции двумерного лапласиана на радиусах осреднения от 15 до 80 км получена возможность независимо от глубины и углов склонов подчеркивать особенности рельефа — делать их гораздо более выразительными, чем обычное изображение рельефа (см. рис. 3—5). Особенности рельефа использовались в качестве базы, т. е. «начального приближения» для построения блоковой структуры — набора линейных структурных элементов, которые пересекаются также линейными элементами субортогонального простириания. Разные радиусы осреднения подчеркивают особенности, отвечающие разным масштабам и, возможно, глубинности. Полагая, что тектоническая структура определяет особенности как рельефа дневной поверхности, так и гравитационных и магнитных полей, мы выстроили линейные системы предполагаемых разломов (или границ тектонических блоков) таким образом, чтобы



**Рис. 4. Карты аномалий в свободном воздухе (слева) и двумерного нормированного лапласиана, рассчитанного в окнах радиуса 24 км (в центре) и 42 км (справа).**



**Рис 5. Карты аномалий Буге (слева) и двумерного нормированного лапласиана, рассчитанного в окнах радиуса 26 км (в центре) и 44 км (справа).**

визуально минимизировать рассечения однородных областей гравитационных и магнитного полей и их трансформант. Так были выделены северо-западные системы дислокаций (глыбово-claveишная структура коры), структурообразующие нарушения в северо-восточном направлении и субширотные нарушения, которые обнаруживаются по геофизическим данным [Сляднев и др., 2006]. Очевидно, что такой способ трассирования линейных структур пока не обеспечивает численной оценки достоверности результата, более того, при добавлении информации, связанной с тектонической характеристикой района, линейная схема может быть скорректирована. Однако формализация и автоматизация процесса трассирования линейных структур по совокупности разнородной информации, да еще в условиях интерференции процессов различной направленности — довольно сложная задача с непредсказуемым результатом, поэтому на первом этапе нашего исследования мы остановились на ручном, визуальном способе.

Следующий шаг на пути формализации выделения пространственных закономерностей связи различных полей и их трансформант (мы предполагаем, что в значительной мере такая связь обусловлена тектоническими причинами) — вычисление корреляционных функций в скользящем окне. Этот вид трансформации требует осторожности ввиду различной природы сравниваемых карт и интерференции процессов разной пространственной ориентации, которая реализуется, возможно, различным образом для различных полей. Особенности поведения корреляционных функций в плане могут служить дополнительным фактором для коррекции положения границ линейных структур.

### Моделирование гравитационного поля

**Построение плотностной модели.** Оценки плотности горных пород производились в земной коре и верхней мантии по результатам сейсмической томографии [Бушенкова и др., 2022]. Для коры оценка производилась через корреляционную связь скорость—плотность [Дортман, Магид, 1968], полученную по образцам пород. Аномальные плотности каждого эшелона коровых источников вычислялись как отклонение от средней плотности эшелона.

Для верхней мантии пересчет скоростей в плотности осуществлялся в предположении термического характера скоростных и плотностных аномалий, линейности связи аномалий скорость—плотность с температурой с коэффициентами связи, зависящими от глубины и химического состава пород [Sobolev, Babeyko, 1994; Sobolev et al., 1996, 1997]:

$$\Delta\rho = \alpha\Delta T\rho_0, \quad \Delta T = \beta\Delta V / V, \quad (6)$$

где  $\Delta\rho$ ,  $\Delta V$ ,  $\Delta T$  — плотностные, скоростные и тепловые аномалии;  $\rho_0$  и  $V$  — средняя плотность и скорость в слое;  $\alpha = 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/\text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\beta = 100$  (0–80 км), 80 (80–180 км)  $^\circ\text{C}/1\text{ } \%$ . Среднее значение плотности определено из корреляционной связи скорость—плотность для образцов, абсолютная скорость известна из референтной модели ak135 [Montagner, Kennett, 1996].

**Прямая задача** вычислялась для сеточной функции плотности ( $1 \times 5 \times 5$  км) алгоритмом, описанным в [Мартышко и др., 2015]. Поскольку расчет проводился по аномальному распределению плотности, обусловленному сейсмотомографической моделью, влияние внешних источников (краевой эффект) не учитывалось. Стоит отметить, что в силу особенностей распределения информации о скоростях сейсмических волн с глубиной можно наблюдать отсутствие высокочастотных аномалий в северной части модели гравитационного поля.

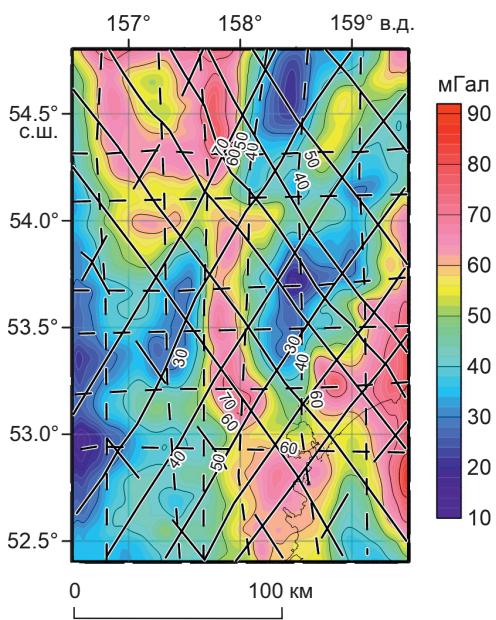
## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ И СОПОСТАВЛЕНИЯ

**Сопоставление трансформант потенциальных полей и рельефа дневной поверхности.** По методике, описанной выше, нами была создана схема линейных элементов тектонической структуры района, образованной двумя парами линейных систем (предполагаемых) разрывов субортогонального направления. На рисунках 3—10 эти линейные элементы структуры показаны черными линиями, непрерывными — для северо-восточного/северо-западного направлений и штриховыми линиями — для субширотного/субмеридионального направлений. Линии северо-западного направления на юго-западе области, показанные длинными штрихами, локализованы неустойчиво. При анализе указанных карт и сопоставлении графиков рис. 2 отчетливо выявляются некоторые закономерности, связывающие разные трансформанты гравитационного поля и рельеф. Наиболее четко видна связь между трансформантой рельефа и вертикальной производной гравитационного поля (белый и зеленый графики на рис. 2, 3 и 7): явно прослеживается прямая корреляция, однако местами особенности рельефа дают более детализированную картину, тогда как производная отражает в основном крупные структурные объекты. Корреляция между аномалией Фая (см. рис. 2, синий график; рис. 4, 8) и осредненным рельефом ожидаемо высока. Локальные аномалии Буге (см. рис. 2, красный график; рис. 5) иногда имеют обратную корреляцию с аномалиями Фая, чаще сдвинуты относительно локальных аномалий Фая и почти всегда коррелируют с их вертикальным градиентом. Связь локальных аномалий Буге с особенностями рельефа довольно сложная: корреляция может отсутствовать или быть как положительной, так и отрицательной. Такая изменчивость связи форм рельефа и аномалий Буге обусловлена прежде всего знаком разницы фактической плотности пород, слагающих рельеф, и плотности, используемой для вычисления поправки Буге. Если это различие отсутствует, то локальные аномалии Буге не связаны с формами рельефа. Факт наличия связи (положительной или отрицательной) аномалий Буге с рельефом и его трансформантой может указывать на латеральные вариации плотности и, вероятно, на связь этих вариаций с геодинамическими процессами, которые привели к возникновению выделяемых особенностей рельефа.

С другой стороны, выявляется связь особенностей рельефа с компонентой аномалии Буге, обусловленной крупными структурами. Это может указывать на глубинность динамических процессов, породивших данные особенности, что должно проявиться при анализе результатов, полученных сейсмическими методами.

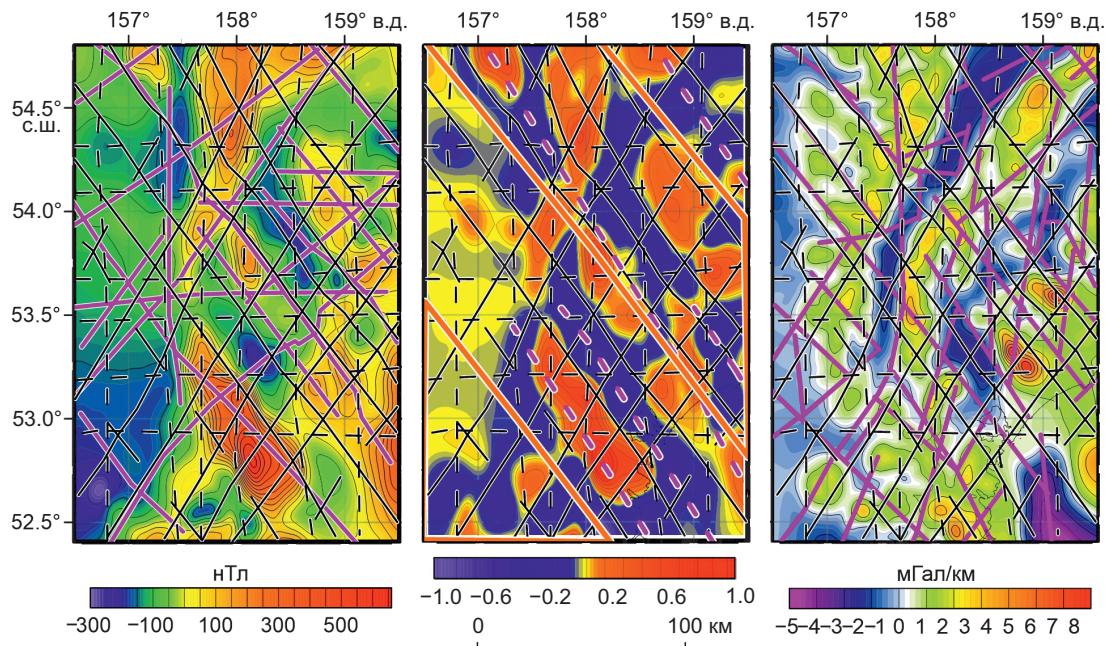
Отдельно стоит вопрос о возможном отражении глубинных процессов и плотностных неоднородностей в выделяемых нами зональных тектонических структурах. Мы сделали попытку исключить из модели «наблюденного» гравитационного поля компоненту, связанную с приповерхностными аномалиями, обусловленными рельефом. Для этого была использована частотная винеровская фильтрация. Разделение поля на часть, которая коррелирует с рельефом, и «остаточное» дало результат, приведенный на рис. 6. В полученном поле мы отчетливо видим субмеридиональные и субширотные зональности и в меньшей степени северо-восточного направления, что также характерно для распределения аномалий сейсмических скоростей на глубинах более 60 км. В целом полученные аномалии не противоречат нашей линейной тектонической схеме.

Подтверждения корректности построенной блоковой схемы и ее связи с тектоническими процессами можно искать в распределении геофизических аномалий других геофизических полей. Ранее неоднократно отмечалось, что структура магнитного поля тесно связана с тектонической структурой [Витте и др., 1978, 2009; Витте, Василевский,



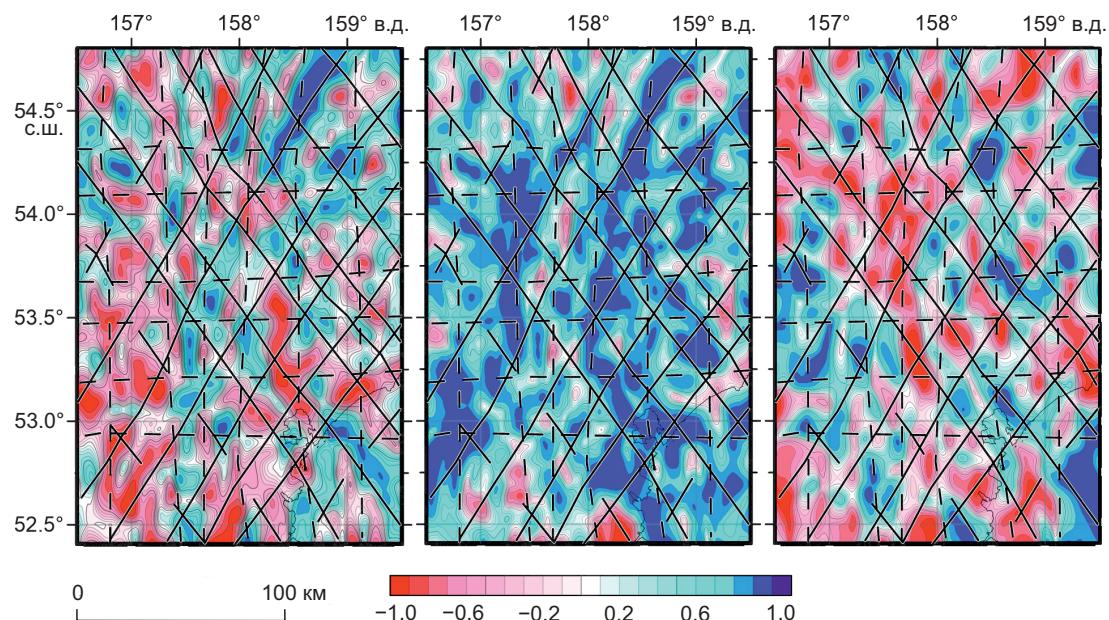
2013; Брусиловский и др., 2014; Яроцкий, 2014]. Поэтому для полученной блоковой структуры выполнено сопоставление с особенностями аномального поля глобальной модели литосферных магнитных аномалий (рис. 7) EMAG2 v.3.

На представленной карте (см. рис. 7) наблюдается явная корреляция особенностей магнитного поля и блоковой структуры. Особенности аномального магнитного поля выражены совокупностью ре-



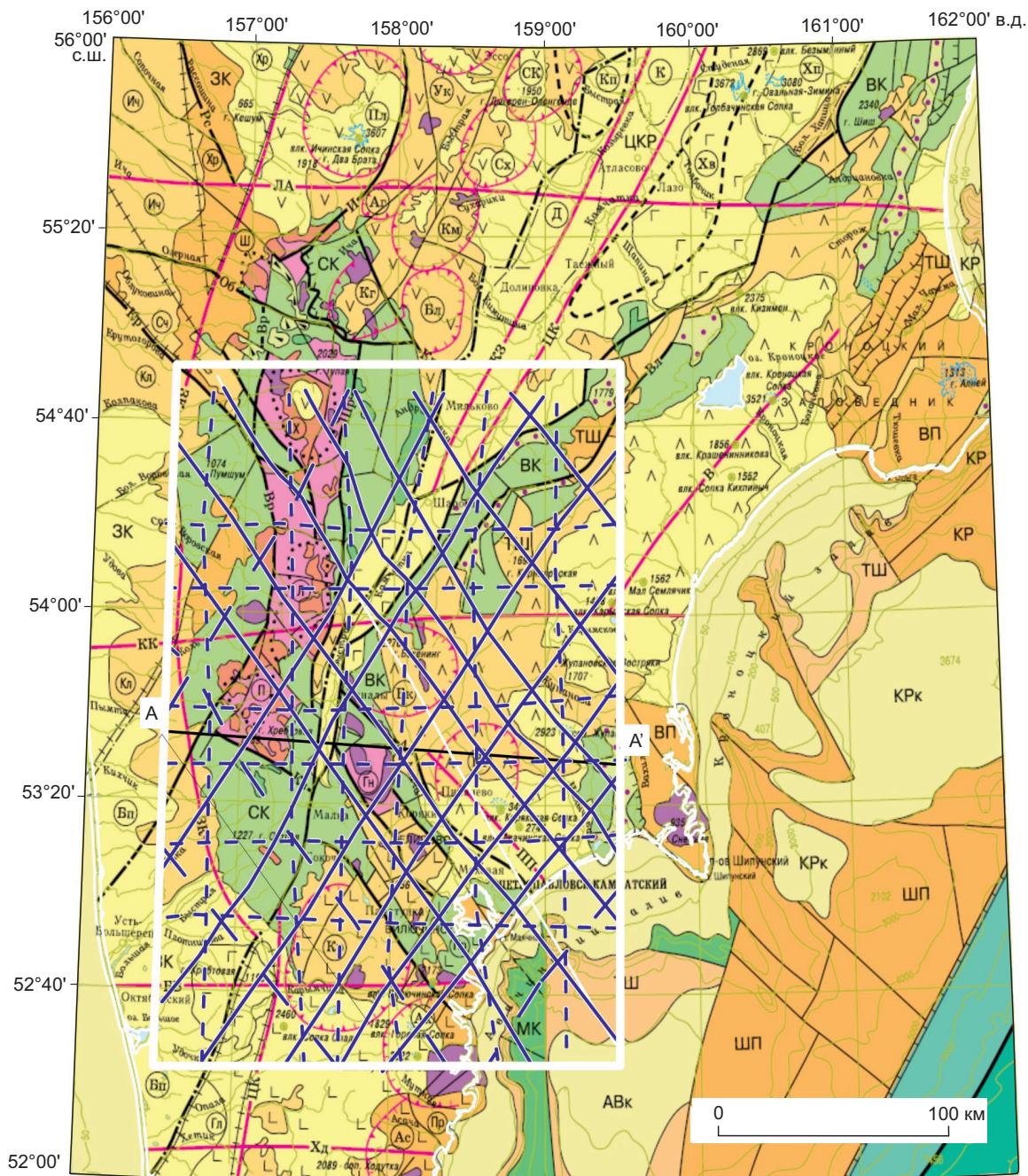
**Рис. 7. Аномалии магнитного поля (слева), карта распределения их 2D нормированного лапласиана (в центре) и карта вертикальных градиентов силы тяжести на высоте 8 км.**

Сопоставление построенной тектонической схемы (черные линии на фоне карт) с опубликованными работами: слева, фиолетовые линии — разрывные нарушения, по [Апрелков, Попруженко, 2009]; в центре, фиолетовые линии — разрывы по [Авдейко и др., 2003], оранжевые линии — поперечные глыбовые разломы, по [Яроцкий, 2014]; справа, фиолетовые линии — разрывные нарушения, по [Селиверстов, 2009].



**Рис. 8. Карты коэффициентов корреляций в скользящем окне диаметром 20 км между распределениями нормированного 2D лапласиана, рассчитанного в окнах радиуса 42—44 км:**

слева — между рельефом и аномалиями Буге; в центре — между рельефом и аномалиями силы тяжести в свободном воздухе; справа — между аномалиями магнитного поля и аномалиями силы тяжести в свободном воздухе.

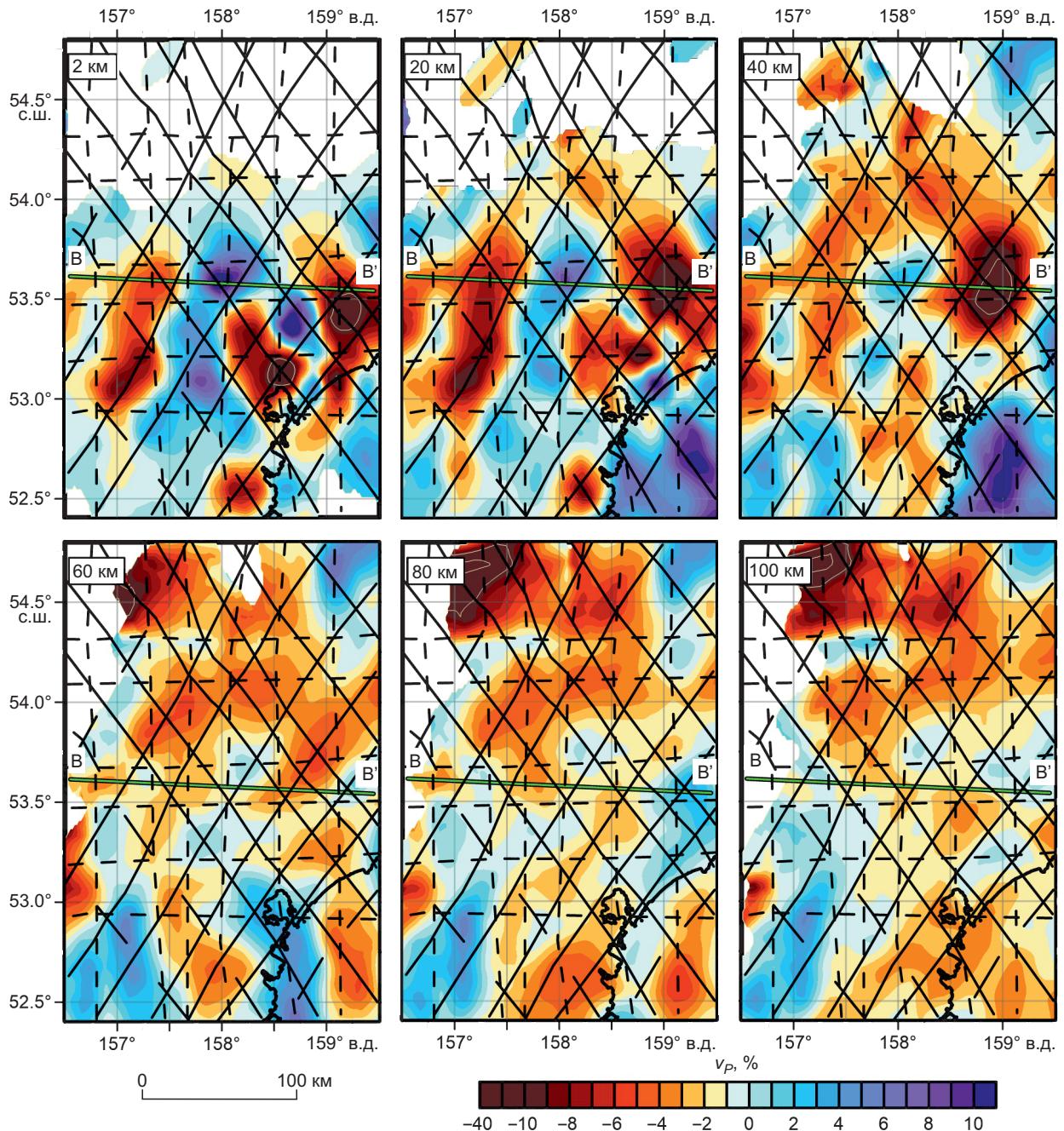


**Рис. 9. Сопоставление построенной линейной схемы и тектонической карты [Сляднев и др., 2006]**

Белой рамкой отмечена область исследования.

гиональных линейных систем положительного и отрицательного знаков в сочетании с локальными мозаичными системами. Структура поля определяется ярко выраженным так называемым Камчатским простиранием гравимагнитных полей, что обусловлено таким же генеральным направлением структур земной коры, устанавливаемых по геологическим материалам [Яроцкий, 2014]. Прослеживаются также субширотная и субмеридиональная зональности.

Результаты сопоставления данных различных типов для выявления пространственных закономерностей их распределения с помощью вычисления корреляционных функций [Шрайбман и др., 1977; Никитин, Хмелевской, 2004; Рыскин, Сокулина, 2006; Долгаль, 2012; Шевнин, 2020] в скользящем окне представлены на рис. 8. В предположении, что в значительной мере связь между высотами рельефа, аномалиями силы тяжести и аномалиями магнитного поля обусловлена тектоническими причинами, особенности распределения коэффициентов корреляции должны быть согласованы с тектонической

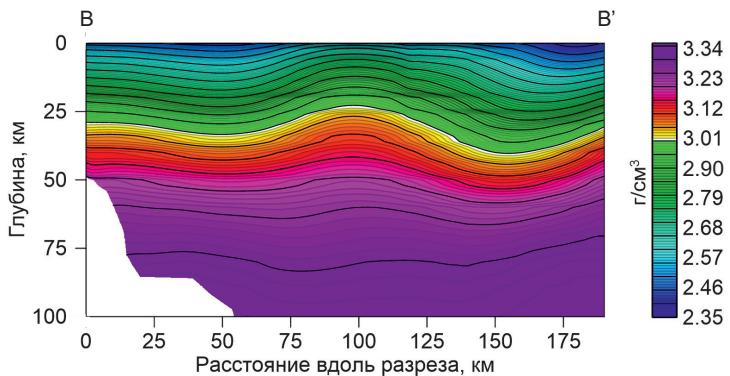


**Рис. 10. Сопоставление построенной тектонической схемы и срезов модели аномалий скорости  $P$ -волн на разных глубинах.**

Зеленой линией  $B—B'$  отмечено положение плотностного разреза, приведенного на рис. 11.

структурой. Чтобы такое сопоставление сделать более явным, вместо исходных полей были использованы их трансформанты (2D лапласиан). Коэффициенты корреляций рассчитывались в скользящих окнах диаметром 20 км, а для расчета нормированного 2D лапласиана использовались окна радиуса 42—44 км. На рисунке выделяются протяженные зоны положительных и отрицательных значений и достаточно хорошо заметны соответствия особенностей поведения коэффициентов корреляции и направленности зон блоковой структуры, часто эти особенности подчеркивают ранее выделенные линейные структуры, особенно субмеридиональные.

Выявленные элементы были нанесены на тектоническую карту м-ба 1:2 500 000 (рис. 9) [Сляднев и др., 2006]. Структурные элементы неплохо вписываются в общую картину, местами имея продолжение в соседних областях.



**Рис. 11. Сечение 3D распределения плотностей горных пород,**  
рассчитанных по распределению скоростей сейсмических волн, представленных в виде аномальных значений на рис. 10, вдоль линии В—В'.

### Сопоставление линейно-блоковой схемы с распределением сейсмических скоростей в пределах литосферы.

Горизонтальные срезы новой сейсмомагнитографической модели аномалий скоростей продольных сейсмических волн [Бушенкова и др., 2022; Bushenkova et al., 2022] в диапазоне глубин 2—100 км также демонстрируют высокую степень согласованности с выделенной блоковой структурой (рис. 10), хотя «интерференция» различных направлений также присутствует.

Наблюдаемая согласованность распределения аномалий скоростей продольных волн на разных глубинах с построенной тектонической схемой указывает на глубинную преемственность выделенных структурных элементов в северо-восточном и северо-западном направлениях. Эта зональность преобладает до глубин 40 км, глубже явно прослеживается только северо-восточное направление. Субширотные и субмеридиональные структурные элементы лучше всего проявляются на больших радиусах осреднения трансформанты рельефа и для глубинных срезов аномальных скоростей продольных волн (60 км и более).

**Связь скоростных аномалий с гравитационным полем.** Как было сказано выше, оценка распределения плотностей в земной коре и верхней мантии (рис. 11) производилась по скоростям сейсмических волн, полученных сейсмической томографией (см. рис. 10) [Бушенкова и др., 2022].

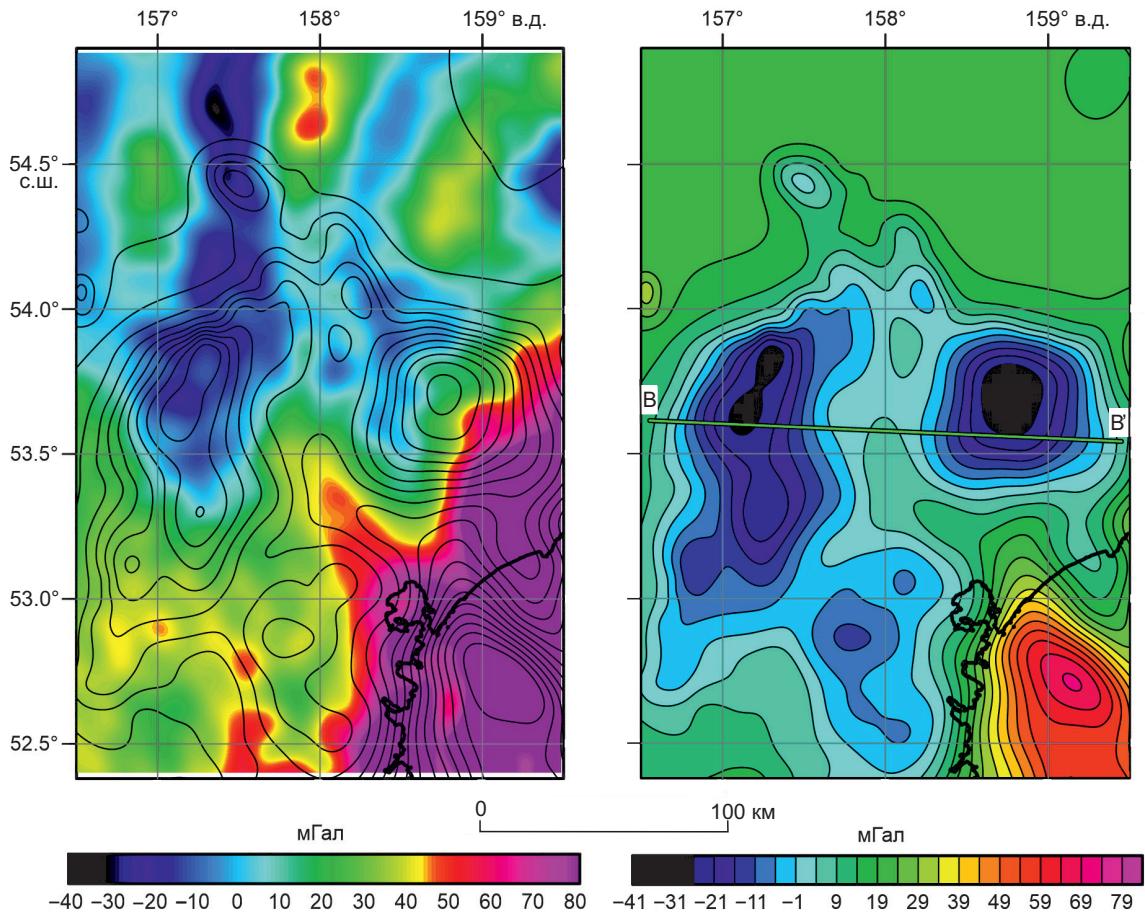
Гравитационные аномалии Буге были сопоставлены с гравитационным полем, полученным из решения прямой задачи (рис. 12). Прослеживается явная согласованность источников аномальных полей в центральной части области, что обеспечено высоким разрешением сейсмических данных. Наблюдаются две крупные отрицательные аномалии гравитационного поля, которые связаны со Срединным хребтом и Восточно-Камчатским вулканическим поясом соответственно. Между ними происходит уменьшение амплитуды аномалии, что соответствует Центрально-Камчатской депрессии [Сляднев и др., 2006]. Отметим, что в общих чертах рассчитанное поле имеет большое сходство с полем, полученным с помощью винеровской фильтрации влияния неоднородности рельефа (см. рис. 6), особенно, если не принимать во внимание краевые эффекты спектральных преобразований.

Таким образом, согласованность между гравитационным полем и построенной блоковой схемой может объясняться не только соответствием особенностей форм рельефа и латерального распределения плотностных аномалий в приповерхностной зоне (включая неоднородности плотности, вызванные вариацией рельефа), но и распределением глубинных масс. Связь распределения скоростных аномалий с блоковой структурой и одновременно с интенсивностью гравитационных аномалий подтверждает тектоническую природу этих особенностей.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом можно говорить о высокой степени корреляции особенностей аномалий гравитационных полей, их трансформант и особенностей рельефа, что обусловлено одной причиной — тектоническими процессами. Аналогичные заключения можно найти в предшествующих работах. Например, линейные структурные элементы были ранее выделены и сопоставлены с историей развития региона в работах [Авдейко и др., 2003; Апрелков, Попруженко, 2009; Селиверстов, 2009; Яроцкий, 2014]. Выделенные этими авторами структурные элементы во многом совпадают с нашей схемой. Различия в трассировке разрывных нарушений обусловлены сложной блоковой структурой, образованной в основном тремя системами разной направленности.

Определяющее значение в развитии исследуемого региона имеют глубинные дислокации северо-восточного направления, которые разграничивают складчатые структуры региона и формируют так называемую продольную структуру. Продольная структура отражает зональность основных геодинамических процессов в регионе: субдукции океанической литосферной плиты, вулканализма, надвигов и коллизий [Яроцкий, 2014; Добрецов, Василевский, 2018].



**Рис. 12. Карты аномалий Буге: измеренные и рассчитанные.**

Слева: карта аномалии Буге (цветовой код) с наложенными изолиниями гравитационного поля, представленного на карте справа. Справа: результат решения прямой задачи для плотностной модели, рассчитанной по скоростным аномалиям, представленным на рис. 10. Зеленая линия BB' – плотностной разрез, отображенный на рис. 11.

Крайне интересно северо-западное или поперечное направление развития глубинных дислокаций, которое связывают с Алеутскими нарушениями. Они расчленили развивающуюся долгое время по северо-восточному плану геосинклинальную систему на разные глыбы, которые в результате начали претерпевать частные отклонения в своем развитии, что также выражается в значительной дифференциации вертикальных движений и нарушении изостазии, мощности слоев коры и коры в целом [Яроцкий, 2014]. Заметим, что выделенная нами система поперечных разрывов, если отклоняется от ранее построенных схем, то очень часто проходит по средней линии между различными версиями траекторий границ блоков (сравните левую и правую карту рис. 7 и три системы разрывов на центральной карте).

Третья выделенная система — субширотная. Она образует глубинные разломы, выделяемые по геофизическим данным. Эти нарушения носят сдвиговый характер, они моложе северо-восточных, и с ними связан разворот блоков, смена направления простирания пород [Апрелков, Попруженко, 2009; Сляднев и др., 2013]. В наших построениях на рис. 3 (радиусы осреднения 42 и 70 км) и рис. 5 (аномалии Буге) субширотные зоны также просматриваются. Субширотные структурообразующие направления, как описывалось выше, также хорошо проявляются для глубинных срезов аномалий скоростей сейсмических волн.

Различия в деталях построений наших и предшественников можно объяснить отсутствием привязки нашей схемы к полевым геолого-тектоническим инструментальным наблюдениям и различной трактовкой локальных проявлений интерферирующих деформационных процессов верхней части земной коры, отраженных в сложных формах рельефа. Построенная схема не является идеальной, однако полученные результаты и предложенная технология могут рассматриваться как начальное приближение для более тонкого, детального и предметного анализа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данных гравитационного, магнитного полей и рельефа позволило построить на территории Камчатского полуострова новую схему тектонической структуры района, представленную развернутыми относительно друг друга (на 30—40°) двумя парами линейных систем (предполагаемых) разрывов субортогонального направления. Проведенный анализ выявил принципиальную согласованность модели аномалий сейсмических скоростей, полученной методом сейсмической томографии, с данными потенциальных полей и построенной линейной тектонической структурой. Выявлены направления линейных структур северо-восточного и северо-западного направлений, а также субширотного и субмеридионального простирианий. Показано, что субмеридиональная зональность характерна для аномалий скоростей сейсмических волн, так и для гравитационных аномалий, обусловленных глубинными плотностными неоднородностями.

Сопоставление построенной схемы с ранее опубликованными работами и картами отражает ее принципиальную связь с геолого-тектоническими воззрениями предшествующих исследователей, изучавших проявления в геофизических полях и рельфе в различные этапы тектонических процессов, формирующих структуру Камчатки. В наших построениях наиболее явно проявляются линейные структуры, образованные: 1) основными геодинамическими процессами в регионе («продольное направление»); 2) влиянием Алеутских нарушений («поперечное направление»); 3) разворотом блоков, сменой направления простириания пород (субширотные сдвиговые). С другой стороны, описанный метод анализа позволил обобщить имеющиеся тектонические схемы, отличающиеся в деталях, которые возникают из-за различной трактовки локальных проявлений деформационных процессов верхней части земной коры, отраженных в сложных формах рельефа.

Таким образом, показана эффективность предложенной методики совместного анализа геофизических полей, рельефа дневной поверхности и их трансформант для выявления пространственных связей и блоковой структуры среды, которые могут послужить основой для построения концептуальных моделей при геологической интерпретации потенциальных полей.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ 22-27-00215.

## ЛИТЕРАТУРА

**Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.** Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле, 2003, № 1, с. 32—60.

**Апрелков С.Е., Попруженко С.В.** Пенжинско-Западно-Камчатская складчатая зона и Укэлайтрединный блок в структуре Корякского нагорья и Камчатки // Тихоокеанская геология, 2009, т. 28, № 4, с. 90—104.

**Брусиловский Ю.В., Баранов Б.В., Бабаянц П.С.** Анализ магнитного поля фронтальной области центральной части Курильской островной дуги // Геофизические исследования, 2014, т. 15, № 3, с. 13—23.

**Бушенкова Н.А., Бергаль-Кувикас О.В., Гордеев Е.И., Чебров Д.В., Кулаков И.Ю., Абкадов И.Ф., Яковлев А.В., Ступина Т.А., Новгородова А.М., Дроздина С.Я.** Структура надсубдукционного комплекса центральной зоны Камчатки по данным плотных сейсмологических сетей // Вулканизм и связанные с ним процессы. (Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30—31 марта 2022 г.). Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2022, с. 95—98.

**Витте Л.В., Василевский А.Н.** Геологическая природа региональных магнитных и гравитационных аномалий Монголо-Забайкальской провинции Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (12), с. 1851—1860.

**Витте Л.В., Василевский А.Н., Шарловская Л.А.** Перестройка коры и магнитное поле юга Восточной Сибири // Геология и геофизика, 1978, (12), с. 13—28.

**Витте Л.В., Василевский А.Н., Павлов Е.В.** Региональные магнитные и гравитационные аномалии Сибирского кратона и их геологическая природа // Геофизический журнал, 2009, т. 31, № 6, с. 21—37.

**Глухманчук Е.Д., Василевский А.Н.** Характеристика зон трещиноватости по неоднородности структуры поля деформаций отражающих горизонтов // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (1), с. 106—112.

**Добрецов Н.Л., Василевский А.Н.** Гравитационное поле, рельеф и вулканические комплексы Камчатки и зоны соединения с Алеутской дугой // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (7), с. 972—999.

**Добрецов Н.Л., Василевский А.Н.** Отражение постгляциальных поднятий в гравитационном поле и неоген-четвертичных структурах // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (12), с. 1661—1691.

**Долгаль А.С.** Комплексирование геофизических методов. Пермь, ПГНИУ, 2012, 167 с.

**Дортман Н.Б., Магид М.Ш.** Скорость упругих волн в кристаллических породах и ее зависимость от влажности // Докл. АН СССР, 1968, т. 179, № 1, с. 76—79.

- Керимов И.А.** Использование  $F$ -аппроксимации при интерпретации гравиметрических данных. I. Методика и результаты опробования на модельных примерах // Физика Земли, 2003, № 1, с. 57—76.
- Керимов И.А.**  $F$ -аппроксимации рельефа земной поверхности // Физика Земли, 2009, № 8, с. 101—112.
- Керимов И.А.** Метод  $F$ -аппроксимации при решении задач гравиметрии и магнитометрии. М., Физматлит, 2011а, 264 с.
- Керимов И.А.** Теория и компьютерные технологии линейных аналитических аппроксимаций аномальных потенциальных полей // Геология и геофизика Юга России, 2011б, № 2, с. 50—63.
- Керимов И.А.** Аналитическое продолжение потенциальных полей на основе  $F$ -аппроксимации // Геология и геофизика Юга России, 2015, т. 5, № 1, с. 21—34.
- Керимов И.А.** Методы гравитационной томографии на основе  $F$ -аппроксимации // Геология и геофизика Юга России, 2020, т. 10, № 1, с. 55—67.
- Керимов И.А., Степанова И.Э., Раевский Д.Н.** Комбинированные аппроксимационные методы решения задач гравиразведки и магниторазведки // Геология и геофизика Юга России, 2018, т. 8, № 3, с. 37—50.
- Кожурин А.И.** Активные разломы Центральной Камчатки: параметры, сейсмический потенциал // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России, 2019, с. 172—176.
- Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В.** Использование универсального опорного спектра для оценки отношения шум—сигнал в фильтре Винера // Журнал радиоэлектроники, 2015, № 7, 9 с.
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Бызов Д.Д.** О решении прямой задачи гравиметрии в рамках конечно-элементного подхода // Уральский геофизический вестник, 2015, № 1 (25), с. 42—45.
- Мартышко П.С., Ладовский И.В., Федорова Н.В., Бызов Д.Д., Цидаев А.Г.** Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. Екатеринбург, УрО РАН, 2016, 94 с.
- Никитин А.А., Хмелевской В.К.** Комплексирование геофизических методов. Тверь, ГЕРС, 2004, 294 с.
- Рыскин М.И., Сокулина К.Б.** Комплексная интерпретация геофизических данных. Саратов, СГУ, 2006, 153 с.
- Селиверстов Н.И.** Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский, КамГУ им. Витуса Беринга, 2009, 191 с.
- Сляднев Б.И., Шаповаленко В.Н., Крикун Н.Ф., Полетаева А.А., Ротман В.К., Сидоренко В.И., Сидоров Е.Г., Суриков С.Н., Хасанов Ш.Г.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2006, 376 с.
- Сляднев Б.И., Боровцов А.К., Сидоренко В.И., Сапожникова Л.П., Тарапин И.А., Бадрединов З.Г., Суриков С.Н., Сидоров М.Д., Сидоров Е.Г., Дундо О.П., Опекунов А.Ю., Дундо Г.П., Кацаев В.П., Ковтунович П.Ю., Королева Н.В., Хитров В.В., Савицкий А.В.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист О-58 — Усть-Камчатск. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2013, 256 с.
- Хорн Б.К.** Зрение роботов. М., Мир, 1989, 487 с.
- Шевнин В.А.** Геофизика. Комплексная обработка геофизических методов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2020, 83 с.
- Шрайбман В.И., Жданов М.С., Витвицкий О.В.** Корреляционные методы преобразования и интерпретации геофизических аномалий. М., Недра, 1977, 237 с.
- Яроцкий Г.П.** Поперечные дислокации активных окраин континентов Тихоокеанского рудного пояса. Геофизические исследования. Кн. 2 и 3. Петропавловск-Камчатский, КамГУ им. Витуса Беринга, 2014, 322 с.
- Andersen O.B., Knudsen P.** Deriving the DTU15 Global high resolution marine gravity field from satellite altimetry. Abstract from ESA Living Planet Symp. (Prague, Czech Republic, 2016), Pap. 1558, [http://lps16.esa.int/page\\_session189.php#1558p](http://lps16.esa.int/page_session189.php#1558p).
- Avdeiko G.P., Saveliev D.P., Palueva A.A., Popruzhenko S.V.** Evolution of the Kurile-Kamchatkan volcanic arcs and dynamics of the Kamchatka-Aleutian Junction // Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region. AGU Geophys. Monogr. Ser., 2007, v. 172, p. 37—55.
- Bushenkova N., Bergal-Kuvikas O., Gordeev E.I., Chebrov, D., Koulakov I., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S.** Seismotomographic structure of the central zone of Kamchatka suprasubduction complex according to the dense seismological networks data // EGU General Assembly 2022, 2022, p. 23—27.
- Förste Ch., Bruima S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Marty J.-C., Flechtner F., Balmino G., Barthelmes F., Biancale R.** EIGEN-6C4. The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse // GFZ Data Services, 2015, 28 p.

**Iwasaki T., Levin V., Nikulin A., Iidaka T.** Constraints on the Moho in Japan and Kamchatka // *Tectonophysics*, 2013, v. 609, p. 184—201.

**Lander A.V., Shapiro M.N.** The origin of the modern Kamchatka subduction zone // *Volcanism and Subduction: the Kamchatka Region*. AGU Geophys. Monogr. Ser., 2007, v. 172, p. 57—64.

**Levin V., Shapiro N., Park J., Ritzwoller M.** Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*, 2002, v. 418 (6899), p. 763—767.

**Montagner J.P., Kennett B.L.N.** How to reconcile body-wave and normal-mode reference Earth models? // *Geophys. J. Int.*, 1996, v. 125, p. 229—248.

**Savant S.** A review on edge detection techniques for image segmentation // *Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol.*, 2014, v. 4, p. 5898—5900.

**Sobolev S.V., Babeyko A.** Modeling of mineralogical composition and elastic wave velocities in anhydrous magmatic rocks // *Surv. Geophys.*, 1994, v. 15, p. 515—544.

**Sobolev S.V., Zeyen H., Stoll G., Werling F., Altherr R., Fuchs K.** Upper mantle temperatures from teleseismic tomography of French Massif Central including effects of composition, mineral reactions, anharmonicity, anelasticity and partial melt // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 139, p. 147—163.

**Sobolev S.V., Zeyen H., Granet M., Achauer U., Bauer C., Werling F., Altherr R., Fuchs K.** Upper mantle temperatures and lithosphere-asthenosphere system beneath the French Massif Central constrained by seismic, gravity, petrologic and thermal observations // *Tectonophysics*, 1997, v. 275, p. 143—164.

**Zingerle P., Pail R., Gruber T., Oikonomidou X.** The combined global gravity field model XGM2019e // *J. Geod.*, 2020, v. 94 (7), p. 1—12.