

35. Yapaskurt O. V. Lithology : Textbook. 2nd revised and enlarged edition. Moscow : Infra-M, 2023. 359 p.
36. Korago E. A., Kovaleva G. N., Schekoldin R. A., Ilin V. F., Gusev E. A. et al. Geological structure of the Novaya Zemlya Archipelago (West Russian Arctic) and peculiarities of the tectonics of the Eurasian Arctic. *Geotectonics*. 2022. Vol. 56, No. 2. pp. 123–156.

37. Litvinenko V. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development. *Geochemistry*. 2020. Vol. 80, Iss. 3. ID 125652.

УДК 551.24:550.83(581)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ КАБУЛЬСКОГО МАССИВА



И. В. ТАЛОВИНА,
зав. кафедрой, проф.,
д-р геол.-минерал. наук



Ф. МАНГАЛ,
аспирант



Г. В. СМУК,
студент, georgii.smuk@gmail.com



Н. С. КРИКУН,
ассистент

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Структуры коллизионного генезиса традиционно являются сложными для исследования объектами, поскольку они в большинстве случаев представляют собой гетерогенные многокомпонентные складчатые горные системы, зачастую труднодоступные для непосредственного геологического изучения. Афганистан расположен в области столкновения крупных литосферных плит Евразии и Индостана, поэтому 80 % территории страны покрыто горными сооружениями, среди которых наибольшую высоту имеет хребт Гиндукуш (4–6 км) [1]. Однако в контексте развития специализированного программного обеспечения и появления общедоступных мировых баз данных, содержащих разнотипную геолого-геофизическую информацию, становится возможным дистанционное изучение таких удаленных и труднодоступных геологических структур, как Кабульский блок. Более того, выявление и исследование сутурных зон важно в плане минерагенического потенциала региона [2, 3]. Офиолитовые комплексы, формирующие сутуры,

На основании анализа данных потенциальных полей и распределения землетрясений на территории Афганистана, а также изучения плотности и магнитной восприимчивости образцов офиолитов разработана петрофизическая глубинная модель по интерпретационному профилю через Кабульский блок. Выявлены предполагаемые особенности распределения офиолитовых комплексов в пределах региона и уточнены отдельные структуры сети тектонических нарушений. По результатам интерпретации составлена 3D-модель с блоковой зональностью, принятой в соответствии с концепцией тектоники литосферных плит.

Ключевые слова: Афганистан, Кабульский массив, офиолитовые комплексы, анализ землетрясений, потенциальные поля, петрофизическое моделирование

DOI: 10.17580/gzh.2024.09.11

содержат месторождения и рудопроявления элементов платиновой группы (ЭПГ), хрома, никеля, кобальта [4, 5]. Актуальность исследования обосновывается, кроме того, тем фактом, что большинство структурно-интерпретационных построений, выполненных в рамках обширного изучения Афганистана [6] и, в частности, Кабульского блока [7], являются качественными, но исходят из устаревших концепций геодинамической эволюции геологических структур, в то время как современные глубинные построения опираются на зонально-блоковую модель в рамках концепции тектоники литосферных плит [8, 9].

Общая геологическая характеристика региона исследования

Кабульский массив расположен в пределах юго-восточной части Афганистана и представляет собой отдельный блок земной коры, ограниченный разломами Чаман на северо-западе и Альтимур на юго-востоке (рис. 1) [10, 11].

В предложенной модели Р. Е. Tarponier и др. (статья 1981 г.) Кабульский блок рассматривают как микроконтинент, отделенный от Индийской плиты или других Центрально-Афганских блоков, присоединение которого к Евразийскому континенту предположительно произошло в позднем мелу или раннем палеоцене, затем в эоцене последовала конвергенция Индостана и Кабульского блока. Р. J. Treloar and Ch. N. Izatt (1993) развили эту идею еще дальше, предположив, что

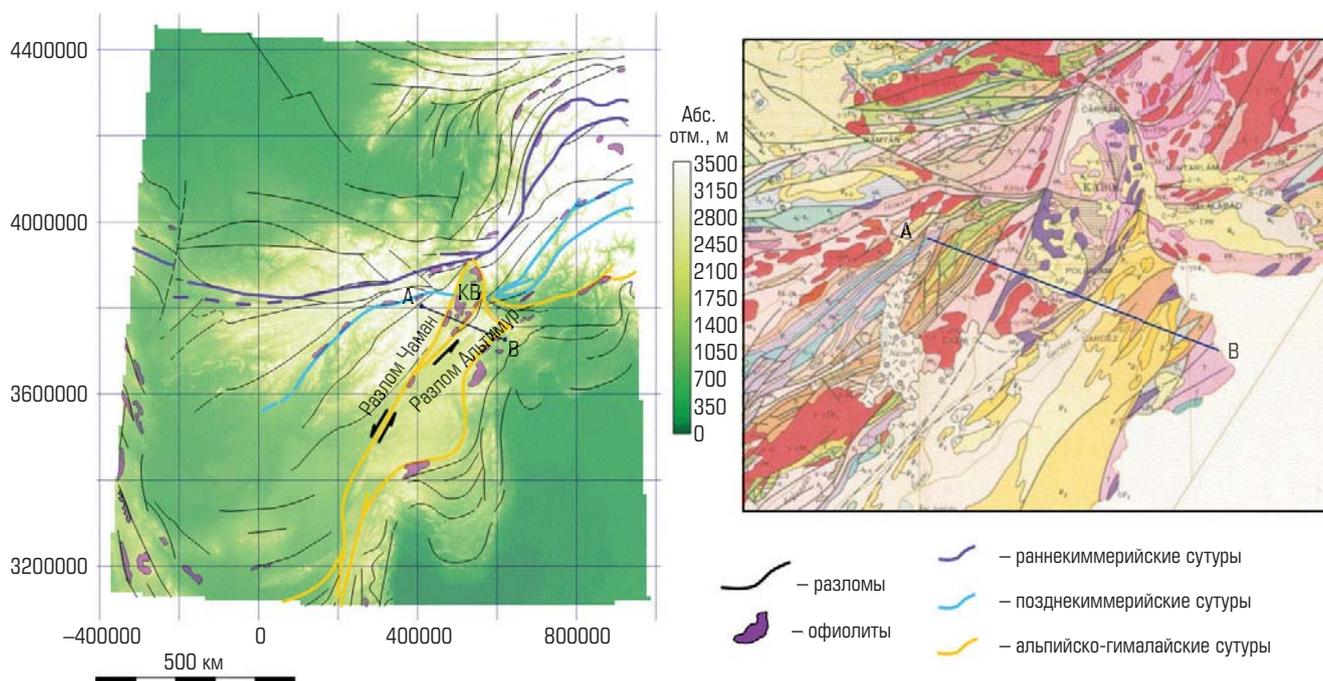


Рис. 1. Тектоническая схема региона исследования, составленная по материалам [10] и нанесенная на топографическую основу совместно с фрагментом геологической карты [11] с обозначенной интерпретационной линией разреза АВ
КВ – Кабульский блок

Кабульский блок может представлять собой фрагмент Индийской плиты, смещенный в результате надвиговых движений. В противоположность этому А. М. С. Şengör (1984) считает, что Кабульский массив являлся составной частью блока Гильменд, расположенного от него к северо-западу.

Кабульский блок состоит из сильно деформированного кристаллического фундамента, перекрытого различными отложениями от палеозойского до кайнозойского возраста. Офиолитовые комплексы в основном лерцолит-гарцбургитового состава, подстилаемые сланцевым меланжем, обдурцены на восточную и западную окраины блока. Эоцен-олигоценые гранитоидные массивы [12] внедряются в южной части блока, а большая часть поверхностных отложений представлена неконсолированными кайнозойскими отложениями.

Методика исследований

Сейсмологические данные. Зоны коллизии характеризуются повышенной сейсмической активностью, связанной с тектонофизическими закономерностями развития сети дизъюнктивных нарушений. Это приводит к необходимости изучения распределения землетрясений на территории Кабульского массива и сопредельных структур.

Данные о сейсмических событиях в пределах территории исследований получены авторами с сайта Геологической службы США [13]. Из базы данных выгружены глубины гипоцентров землетрясений за последние 100 лет с их координатной привязкой, по которым построена карта распределения

землетрясений на исследуемой территории (рис. 2).

В отсутствие данных региональной сейсморазведки возможность исследования глубинного тектонического строения ограничивается методами качественной и количественной интерпретации гравитационного и магнитного полей [14]. Для территории Афганистана подобный анализ потенциальных полей и его трансформант представлены в работе [15]. Особую роль играют трансформации полей, которые позволяют выделять градиентные зоны, интерпретируемые как области распространения дизъюнктивных структур или интрузивных тел.

Гравитационное поле. Офиолитовые комплексы Кабульского блока представлены реликтами древней океанической коры, т. е. основными и ультраосновными магматическими породами, состоящими из минералов с высоким удельным весом, что свидетельствует о необходимости привлечения данных гравитационного поля для анализа распространенности остатков древней океанической коры Палеотетиса в регионе.

Исходные материалы для гравитационного поля получены из глобальной базы данных WGM2012 [16], которая имеет пространственное разрешение в 2 угловые минуты (или 4 км) и широко используется для глубинного моделирования строения литосферы и земной коры [17, 18]. База составлена из данных наземной, воздушной и спутниковой съемки. Большая часть гравиметрических наблюдений на территории Афганистана осуществлена американской Геологической службой в 2006 и 2008 гг. посредством аэросъемки на высоте 7 км над поверхностью земли [19]. Для исследования использована

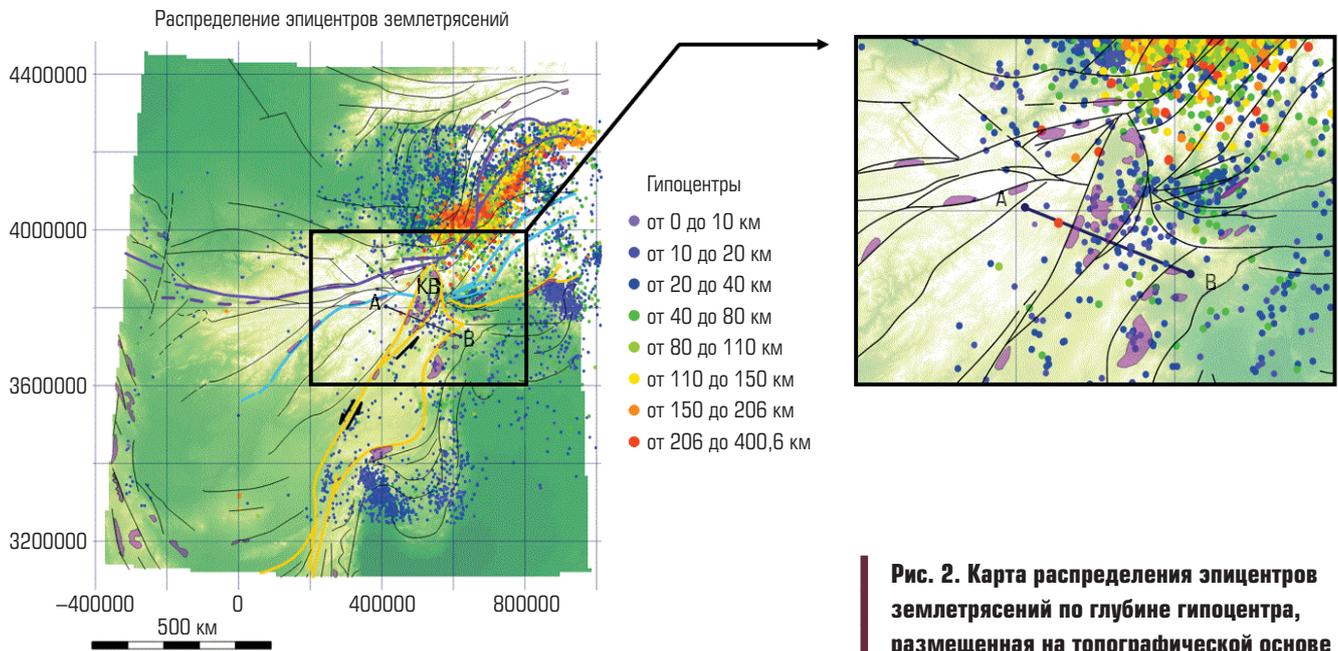


Рис. 2. Карта распределения эпицентров землетрясений по глубине гипоцентра, размещенная на топографической основе

полная сферическая редукция Буге (рис. 3, а), устанавливающая гравитационный эффект исключительно геологической природы и в заданной точке P на земной поверхности [20]:

$$\Delta g_B(P) = g_{\text{obs}}(P) - \gamma(Q) - \delta g_{\text{Surface masses}} + \delta g_{\text{atm}},$$

где $g_{\text{obs}}(P)$ – измеренное поле в точке P ; $\gamma(Q)$ – нормальное поле, вычисленное в точке Q на поверхности теллурида, соотношенной с точкой P ; $\delta g_{\text{Surface masses}}$ – гравитационный эффект масс рельефа (суши, океанов, ледниковых покровов, шельфовых плавучих ледников и внутриконтинентальных водоемов); δg_{atm} – гравитационный эффект атмосферы.

Вертикальную производную гравитационного поля (см. рис. 3, б) используют для выделения локальных объектов, так как принцип фильтрации основан на исключении региональной составляющей из изучаемого поля, что позволяет устанавливать приповерхностные объекты и проследить изменения в структуре поля.

Модуль горизонтального градиента (см. рис. 3, в) является одной из основных трансформаций, используемых для выделения узких градиентных зон, которые могут соответствовать границам тектонических структур или протяженным в плане интрузивным телам. Для гравитационного поля он определяется следующим соотношением

$$\text{THDR}(\Delta g_B) = \sqrt{\left[\frac{\partial(\Delta g_B)}{\partial x} \right]^2 + \left[\frac{\partial(\Delta g_B)}{\partial y} \right]^2}.$$

Однако вследствие дискретности исходных данных расчет выполняют численными методами (заменой дифференциалов конечными разностями) с заданной точностью по сетке.

Магнитное поле. Ультрамафиты и гипербазиты имеют более высокие значения магнитной восприимчивости, чем кислые магматические и большинство осадочных пород.

Более того, в регионе широко распространен процесс серпентинизации существенно оливиновых горных пород, в ходе которого первично-магматические силикаты замещаются серпентином, а железо, частично не вошедшее в его состав, выделяется в форме вторичного серпентинизационного магнетита [21, 22], что делает этот метод чрезвычайно информативным при выявлении офиолитов.

Исходные материалы по магнитному полю получены из мировой базы данных WMM [23], разработанной Американской и Британской геологическими службами на 2020–2025 гг. Основной объем измерений на территории Афганистана выполнен также американской службой, которая провела измерения в 2006 г. в аэроварианте при высоте полета 5 км над поверхностью земли, однако данные по восточной части региона отсутствуют (высокогорная область). Карта исходного магнитного поля представлена на рис. 4, а.

Трудность интерпретации магнитного поля заключается в дипольной структуре аномальных источников, необходимости учета элементов магнитного поля (склонения, наклонения и естественного поля Земли) для конкретного региона. Вследствие обозначенного явления области максимумов могут быть расположены не над самими объектами, а быть смещенными на некоторое расстояние. Кроме того, интерпретация поля осложняется отсутствием информации об остаточной намагниченности офиолитовых комплексов, для которых может быть существенным параметр Кенигсбергера.

Редукция исходного поля к магнитному полюсу (см. рис. 4, б) позволяет посредством фазовой трансформации Фурье-спектра вычислять поле магнитных источников, намагниченных также по абсолютной величине, но вертикально по направлению (в отсутствие остаточной намагниченности) [24]. Таким

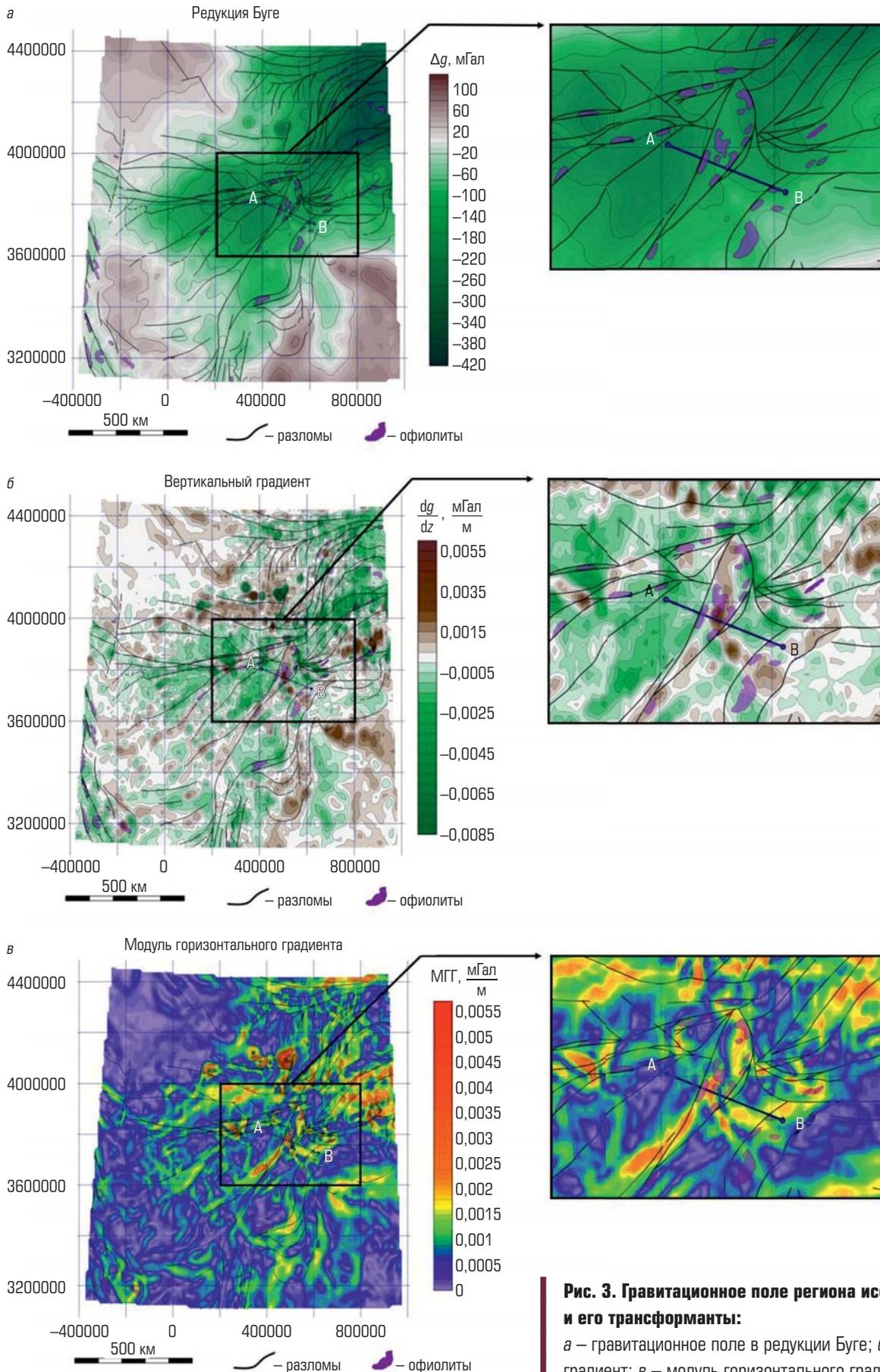


Рис. 3. Гравитационное поле региона исследования и его трансформанты:

а – гравитационное поле в редукции Буге; *б* – вертикальный градиент; *в* – модуль горизонтального градиента (МГГ)

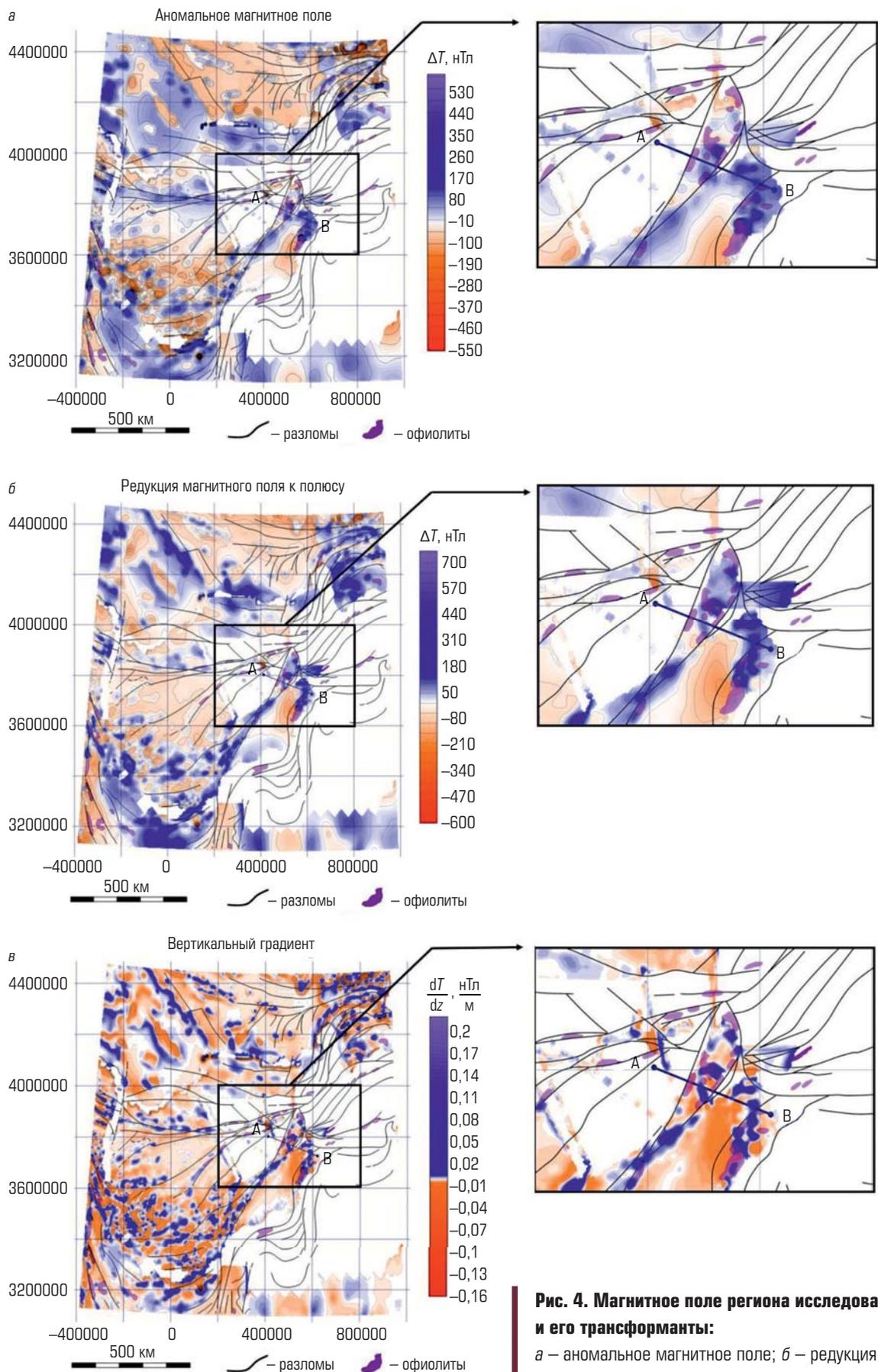


Рис. 4. Магнитное поле региона исследования и его трансформанты:

а – аномальное магнитное поле; *б* – редукция магнитного поля к полюсу; *в* – вертикальный градиент поля на магнитном полюсе

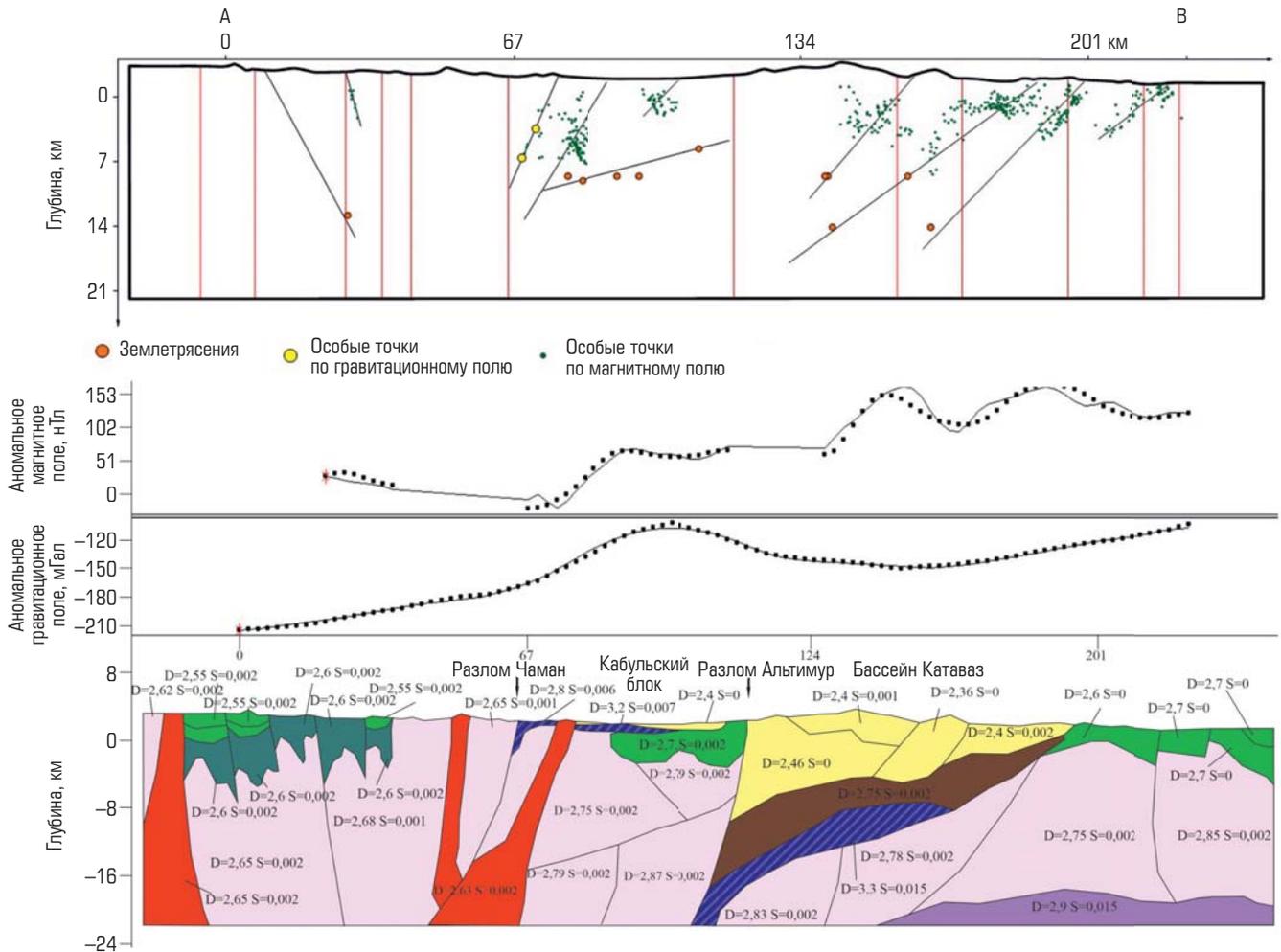


Рис. 5. Структурная (а) и петрофизическая (б) модели по интерпретационному профилю АВ: красным цветом показаны отметки, соответствующие разломам на геологической карте (условно проведены вертикально), черным – граница Мохоровичича – геоструктурные оси, отрисованные по результатам деконволюции Эйлера (ED) и по данным гипоцентров землетрясений.

D (Density) – плотность, *S* (Susceptibility) – магнитная восприимчивость.

образом, аномалии на карте можно сопоставлять с геологическими объектами напрямую. Алгоритм пересчета является нестабильным лишь для низких широт, однако регион исследования можно отнести к средним широтам, не прибегая к дополнительным сложным математическим операциям.

Вертикальная производная магнитного поля (см. рис. 4, в) также может позволить выделить локальные объекты (к примеру, менее крупные комплексы офиолитов), что успешно используют в ходе интерпретации аэромагниторазведки [25]. Следует отметить, что производную берут не от исходного поля, а от поля, отнесенного к магнитному полюсу. При расчете трансформации появляются сеточные области, связанные с невысоким качеством исходного материала в некоторых областях, поэтому для большей представительности трансформации выполнен пересчет вертикального градиента вверх на 2 км.

Деконволюция Эйлера является распространенным

методом количественной интерпретации потенциальных полей, поскольку с достаточной точностью позволяет определять глубину источников, создающих аномальный эффект [26]. В результате расчета по алгоритму Эйлера получают набор координат «особых точек» или сингулярностей в трехмерном пространстве (x, y, z) в случае площадного распределения гравитационных аномалий. Для векторного поля $M(x, y, z)$ уравнение Эйлера можно записать следующим образом:

$$(x - x_0) \frac{\partial M_x}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial M_y}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial M_z}{\partial z} = N(A - M),$$

где (x_0, y_0, z_0) – координаты «особой точки»; N – структурный индекс; A – фоновое значение поля (региональная компонента); M – значения поля в пределах заданного скользящего окна.

Структурный индекс является параметром самого источника, поскольку уравнения полей от различных геометрических

тел представляют собой разный характер зависимости от расстояния до источника [27]. В исследуемом случае акцент сделан на разрывных нарушениях, которые аппроксимируются моделями «контакта». Данной модели в гравитационном поле соответствует структурный индекс 0, а в магнитном – 1. Интерпретационный профиль АВ, как и регион в целом, осложнен многочисленными разрывными нарушениями, поэтому для первичной оценки направления их падения и глубины распространения результаты деконволюции Эйлера, а также точки, отвечающие гипоцентрам землетрясений, посредством фильтрации по координатам нанесены на профиль (рис. 5, а).

Для построения петрофизической модели с учетом свойств офиолитов отобраны 10 образцов из двух областей их распространения. Плотность образцов измеряли методом гидростатического взвешивания [28]. Магнитную восприимчивость определяли с помощью портативного измерителя магнитной восприимчивости (ПИМВ) [29], в котором реализуется частотный способ измерения абсолютной величины кажущегося (вследствие эффекта размагничивания во внешнем поле) параметра. Для каждого образца проведены по 15 измерений, за истинное значение принято среднее: значения плотности и магнитной восприимчивости для измеренных образцов составляют 2,94 г/см³ и 0,0058 ед. СИ соответственно. Результаты измерений приведены в **таблице**. Следует отметить, что корректность определения магнитных свойств считается спорной без учета величины, а также направления вектора остаточной намагниченности, что влечет за собой вероятностный характер модельных построений.

Проведенные петрофизические измерения позволяют с высокой точностью оценивать гравитационный эффект офиолитовых комплексов и с меньшей точностью – магнитный. В программном блоке GM-SYS (Oasis Montaj), являющимся распространенным методом геологического моделирования [30, 31], осуществлен подбор физических свойств и структурных элементов с учетом распределения особых точек и землетрясений вдоль профиля в разрезе. Плотность промежуточного слоя в модели WGM2012 составляет 2,67 г/см³. Магнитная восприимчивость промежуточного слоя принята равной 0,002 ед. СИ. Для исключения влияния рельефа плотность и магнитная восприимчивость воздуха заданы аналогично. Результат подбора гравитационного и магнитного полей приведен на рис. 5, б.

Интерпретация полученных результатов

Комплексный анализ полученных геолого-геофизических данных позволяет сделать ряд выводов о структурно-тектонических особенностях региона исследования.

В наиболее высокогорной области Гиндукуша все землетрясения имеют мантийную природу с глубинами гипоцентров более 200 км, что может означать наличие не

полностью погруженных в мантию остатков оторванного слэба Индийской плиты. На сейсмичность также оказывают влияние движения Аравийской плиты, расположенной на западе и погружающейся под Евразийскую плиту со скоростью около 33 мм/год [32]. Зачастую границы плит характеризуются зоной трансформации (сдвига-сжатия), что может приводить к формированию в регионе структур «цветка» или разнородных взбросо-сдвиговых нарушений. В этом плане основной трансформационной границей является разлом Чаман, ограничивающий Кабульский массив с северо-запада. Глубинность землетрясений вдоль разлома не превышает 40 км, следовательно, они имеют коровую природу, характерную для сдвиговых структур. Данный факт также позволяет предполагать трансформную природу разлома Чаман.

Карта гравитационного поля (см. рис. 3, а) хорошо отображает модель изостатической компенсации, принятой в современной парадигме тектоники литосферных плит – область интенсивного орогенеза маркируется пониженными значениями гравитационного поля, что связано с более глубоким погружением нижней границы литосферной плиты, а области платформенного развития соответственно имеют повышенные относительно горно-складчатых областей значения поля. Гравитационное поле непосредственно Кабульского блока характеризуется средними значениями (от –200 до –100 мГал). На карте вертикального градиента гравитационного поля прослеживаются многочисленные цепочки локальных изометричных в плане аномалий, которые в большинстве случаев соотносятся с сетью тектонических нарушений (см. рис. 3, б). В южной части карты локализируются надвиговые дугообразные структуры, выделяющиеся градиентными областями. Кабульский блок

Петрофизические характеристики офиолитов Кабульского блока

| Координаты точек наблюдения | Образец | Область | Плотность, г/см ³ | Магнитная восприимчивость, ед. СИ |
|-----------------------------|-------------|----------|------------------------------|-----------------------------------|
| N34.84510, E069.42768 | Хромит | Кох Сафи | 4,09 | 0,0025 |
| N34.84532, E069.42707 | Серпентинит | То же | 2,46 | 0,0025 |
| N34.84532, E069.42707 | Пироксенит | – » – | 2,81 | 0,0170 |
| N34.20887, E069.09142 | Дунит | Логар | 2,59 | 0,0009 |
| N34.12955, E069.03477 | Серпентинит | То же | 2,80 | 0,0012 |
| N34.12639, E069.04086 | Дунит | – » – | 3,05 | 0,0003 |
| N34.12639, E069.04086 | Серпентинит | – » – | 2,47 | 0,0209 |
| N34.11701, E069.03070 | Пироксенит | – » – | 3,25 | 0,0052 |
| N34.11701, E069.03070 | Гарцбургит | – » – | 2,90 | 0,0011 |

представляет собой область положительного градиента силы тяжести, что, очевидно, связано с петрографическими особенностями глубинного строения исследуемой структуры, сложенной сильнометаморфизованными породами. Модуль горизонтального градиента гравитационного поля (см. рис. 3, в) подчеркивает доминирующее северо-восточное простирание дизъюнктивной сети региона. Непосредственно Кабульская структура хорошо выделяется по двум зонам повышенного градиента, отвечающим сутурным швам, ограничивающим блок.

В редукции магнитного поля к полюсу (см. рис. 4, а) четко прослеживается цепочка положительных аномалий, простирающаяся вдоль разлома Чаман и проходящая непосредственно через Кабульский блок. Крупная положительная аномалия в пределах Кабульского блока значительно совпадает с контуром офиолитовой формации Логар. Можно заметить, что при редукции к полюсу большая часть отрицательных аномалий в области Кабульского блока, связанных с косым намагничиванием, исчезла, что обосновывает важность используемой трансформации. В редукции к полюсу наблюдается более явная корреляция линейных и цепочечных зон с сетью тектонических нарушений. В трансформации вертикального градиента от редукции к полюсу очень хорошо прослеживается значимая корреляция положительных градиентных зон с локализацией офиолитовых комплексов: они приобретают дополнительную четкость в соответствии максимумов вертикального градиента контурам на тектонической схеме (см. рис. 1).

По результатам интерпретации карт потенциальных полей и подобранных к ним трансформант составлены структурная и петрофизическая модели по профилю (см. рис. 5), также предположительная сводная трехмерная тектоническая модель региона, которая представлена на **рис. 6**, которая наилучшим образом отражает закономерности распределения структурно-вещественных комплексов литосферы как следствие геодинамических процессов на границах плит [33].

На структурной модели разреза (см. рис. 5, а) авторами выделена субгоризонтальная структура в пределах Кабульского блока, построенная по точкам, отвечающим гипоцентрам землетрясений. Важно отметить, что точки имеют не локальное проявление в пределах профиля, а именно: распространяются по площади в пределах Кабульского блока (см. рис. 2).

Ошибка подбора гравитационного поля (см. рис. 5, б) составляет примерно 1,7 мГал, а магнитного поля – 10 нТл, что является допустимым в условиях регионального профиля. Левая часть разреза характеризуется относительно невысокими плотностными характеристиками структур осадочных формаций (2,5–2,6 г/см³) и континентальной коры, что может быть связано с множеством разрывных нарушений, разуплотняющих консолидированный фундамент. Магнитные свойства пород в данной части разреза также лежат в пределах средних значений (0,001–0,002 ед. СИ). Кабульская структура является переходной зоной и маркируется сильной положительной гравитационной аномалией. Разлом Чаман выделяется

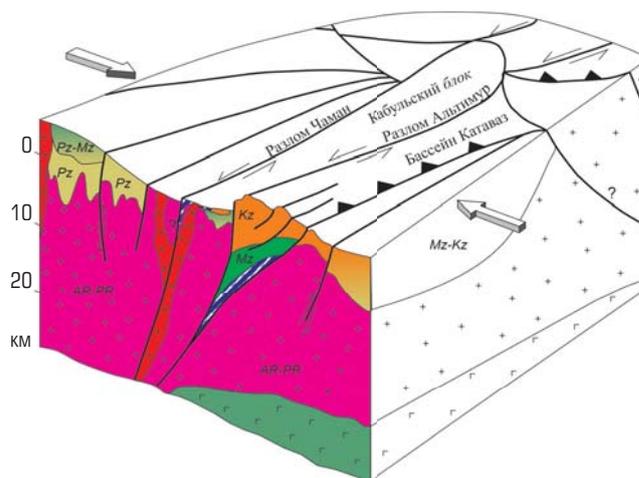


Рис. 6. Зонально-блоковая модель региона исследований

резким положительным скачком в магнитном поле, что связано с появлением в разрезе приповерхностных офиолитовых комплексов, распространенных по площади блока. Повышение гравитационного и магнитного полей в правой части разреза связывают с наличием границы раздела верхней и нижней континентальных кор, которые имеют различный состав (см. рис. 5). На общий тренд гравитационного поля также может оказывать сильное влияние граница Мохоровичича, положение которой, вследствие отсутствия сейсмических изысканий, определить достаточно трудно. Средняя плотность верхней коры по разрезу составляет 2,75 г/см³, при этом в правой части разреза она выше среднего, а в левой граница Мохоровичича ниже. Для нижней коры плотность принята равной 2,9 г/см³. Плотность и магнитную восприимчивость офиолитовых комплексов задавали в максимальном соответствии с полученными петрофизическими характеристиками. Средняя плотность офиолитов в разрезе составляет около 3,1 г/см³, а магнитная восприимчивость границы Мохоровичича – около 0,009 ед. СИ. Однако, как было отмечено ранее, точность моделирования гипербазитов в отсутствие учета остаточной намагниченности существенно снижается.

Заключение

Таким образом, на основании оптимального выбора трансформаций геофизических полей и анализа сейсмических событий, а также петрофизических исследований образцов офиолитов решены основные задачи исследования, а именно: выявлены предполагаемые особенности распределения офиолитовых комплексов в пределах Кабульского блока и уточнены отдельные структуры сети разрывных нарушений. Комплексный анализ разнотипных геолого-геофизических данных показывает большую информативность в изучении особенностей геологического строения Кабульского блока по сравнению с отдельными элементами, что подтверждается исследованиями [34] и определяет значимость работы. Возможность

дальнейших, более детальных исследований связана с проведением региональных сейсмических исследований, которые позволят уточнить имеющиеся результаты и привнести новую информацию. Помимо этого, перспективным видится петрохимический анализ образцов, на основании которого предоставляется возможность формирования детальной геодинамической модели эволюции Кабульского блока [35], и привлечение

материалов дистанционного зондирования, которые успешно применяются при изучении структурно-геологических особенностей [36].

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYY ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 68–77
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.11

Geological and geophysical data interpretation for deep structure study of the Kabul Massif

Information about authors

I. V. Talovina¹, Head of Department, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences

F. Mangal¹, Post-Graduate Student

G. V. Smuk¹, Student, georgii.smuk@gmail.com

N. S. Krikun¹, Assistant

¹Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The scope of the research embraced collection, processing, analysis and interpretation of different-type geological and geophysical data on the Kabul Massif as an autonomous crustal block located in the center of Afghanistan. Reconstruction of geodynamic situations in the test crust area can help investigate global history of geological development in the region, and review concepts on formation of platinum group, chromium, nickel etc. mineralization with a view to assessing mineragenic potential of the area, which defines the relevance of this research. Based on the data on gravitational and magnetic fields, as well as their diverse transformations, the studies verified the basic ideas on the disjunctive structure of the region and on the physical layout of ophiolites. The analysis of hypocenters of earthquakes over the last one hundred years provided information on the deep structure of the specified suites and determined the dominant transpression model of development of the Kabul Block. The adjoint Chaman Fault, which is a leftward regional shear fault, is comprehensively studied. The petrophysical characteristics of ophiolites sampled during field tests in the districts of Lowgar and Kohe Safi are analyzed. The obtained data on the density and magnetic sensitivity of rocks in combination with the plotted maps of different potential fields are used to build a petrophysical deep-structure model of the test region. An important role in reconstruction of deep-seated faults is given to the specific points obtained from Euler deconvolution and with respect to hypocenters of earthquakes. Based on the geological and geophysical data interpretation, the three-dimensional geology and tectonics model is built with the block zonality adopted in conformance with the concept of tectonics of lithosphere plates.

Keywords: Afghanistan, Kabul Massif, ophiolites, earthquake analysis, potential fields, petrophysical modeling.

References

1. Simoniya N. A. (Ed.). Encyclopedia of World's Countries. Moscow : Ekonomika, 2004. 1319 p.
2. Gulbin Yu. L., Akbarpuran Khayati S. A., Sirotkin A. N. Mineral composition and thermobarometry of metamorphic rocks of Western Ny Friesland, Svalbard. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 263. pp. 657–673.
3. Tolstykh N. D., Krivolutsкая N. A., Kanhibue L. S., Gongalsky B. I., Kuzmin I. A. Mineralogical zoning of the PGE-Cu-Ni orebodies in the central part of Oktyabrsky Deposit, Norilsk District, Russia. *Mineralogical Magazine*. 2024. DOI: 10.1180/mgm.2024.20
4. Galimov E. M., Kaminsky F. V. Diamond in the oceanic lithosphere. Volcanic diamonds and diamonds in ophiolites. *Geochemistry International*. 2021. Vol. 59, No. 1. pp. 1–11.
5. Polyaniy V. S. Ophiolites of the Ural–Asia mobile belt : Structure, substance and minerageny evolution, models of formation of mineral deposits. *Georesursy*. 2006. No. 2(19). pp. 31–36.
6. Slavin V. I. Tectonics of Afghanistan. Moscow : Nedra, 1976. 205 p.
7. Gusev I. A. Tectonics of the Kabul Massif, Afghanistan : Thesis of Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Dushanbe, 1984. 19 p.
8. Egorov A. S., Bolshakova N. V., Kalinin D. F., Ageev A. S. Deep structure, tectonics and geodynamics of the Sea of Okhotsk region and structures of its folded frame. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 703–719.
9. Seminskii K. Zh. Hierarchy in the zone-block lithospheric structure of Central and Eastern Asia. *Russian Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49, No. 10. pp. 771–779.
10. Siehl A. Structural setting and evolution of the Afghan orogenic segment—A review.

Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range : Special Publications. London : Geological Society, 2017. Vol. 427. pp. 57–88.

11. Abdullah Sh., Chmyriov V. M. Geological Map of Afghanistan. Scale 1:500 000. Kabul, 1977.
12. Sirotkin A. N., Evdokimov A. N. Vendian age of igneous rocks of the Chamberlain valley area (Northern part of the Wedel Jarlsberg Land, Svalbard Archipelago). *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 255. pp. 419–434.
13. Earthquake Data. U.S. Geological Survey. Available at: <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/science/earthquake-data> (accessed: 15.07.2024).
14. Senchina N., Grigoriev G., Gulin V. Combining non-seismic and seismic information for geological understanding — a case study. *Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering : International Scientific and Practical Conference*. 2023. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 376. ID 01067.
15. Saibi H., Azizi M., Mogren S. Structural investigations of Afghanistan deduced from remote sensing and potential field data. *Acta Geophysica*. 2016. Vol. 64, Iss. 4. pp. 978–1003.
16. Gravity Grids & Models. Bureau Gravimetrique International. Available at: <https://bgi.obs-mip.fr/grids-and-models-2/> (accessed: 15.07.2024).
17. Solano-Acosta J. D., Soesoo A., Hints R. New insights of the crustal structure across Estonia using satellite potential fields derived from WGM-2012 gravity data and EMAG2v3 magnetic data. *Tectonophysics*. 2023. Vol. 846. ID 229656.
18. Kosnyreva M. V., Zolotaya L. A. Interpretation of the potential fields of the area of Ladoga conductivity anomaly. *Engineering and Mining Geophysics : Proceedings of the 14th Conference and Exhibition*. Almaty, 2018. DOI: 10.3997/2214-4609.201800579
19. Azizi M., Saibi H. Integrating gravity data with remotely sensed data for structural investigation of the Aynak–Logar Valley, Eastern Afghanistan, and the surrounding area. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2015. Vol. 8, No. 2. pp. 816–824.
20. Bonvalot S., Balmino G., Briais A., Kuhn M., Peyrefitte A. et al. World Gravity Map: Carte Gravimetrique Monocale. Scale 1:50 000 000. Paris : BGI-CGMW-CNES-IRD, 2012.
21. Gorodnitskiy A. M. (Ed.). Nature of Magnetic Anomalies and Structure of the Oceanic Crust. Moscow : Izdatelstvo VNIRO, 1996. 283 p.
22. Aleksandrova T. N., Chanturiya A. V., Kuznetsov V. V. Mineralogical and technological features and patterns of selective disintegration of ferruginous quartzites of the Mikhailovskoye deposit. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 517–526.
23. World Magnetic Model. National Centers for Environmental Information. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model> (accessed: 15.07.2024).
24. Ravat D. Reduction to Pole. Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Dordrecht : Springer, 2007. pp. 856–858.
25. Movchan I. B., Shaygallyamova Z. I., Yakovleva A. A. Identification of structural control factors of primary gold ore occurrences by method of unmanned aeromagnetic survey by the example of the Neryungirsky district of Yakutia. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 217–233.
26. Senchina N. P. Euler deconvolution in the interpretation of the data of potential fields of the Kazan–Kazhimsky aulacogen. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2021. Vol. 11-2(113). pp. 7–13.
27. Blokh Yu. I. Interpretation of Gravitational and Magnetic Anomalies : Tutorial. Moscow, 2009. 232 p.
28. Filatov V. V., Ivanchenko V. S., Glukhikh I. I. Petrophysics. Petromagnetism in Mining Geophysics. Yekaterinburg : Izdatelstvo UGGU, 2011. 414 p.
29. Ivanchenko V. S., Bazhenova E. A., Popov M. P., Peleshko O. P. The study of magnetic susceptibility of rocks and izumrudnyy sludio in the Mariinsky emerald–beryllium deposit (Middle Urals). *Uralskiy geofizicheskiy vestnik*. 2018. No. 3(33). pp. 24–29.
30. Gawish W. R., Marzouk H. H., Petrov A. V., Maraev I. A. Magnetic data interpretation to determine the depth of basement rocks and structural elements of Mandisha village, El-Bahariya oasis, Western desert, Egypt. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2019. No. 2(54). pp. 7–19.
31. Filippovich A. V. Physical and geological modeling of the Bodrak suite structures with regard to paleomagnetic data : Thesis of Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow, 2022. 25 p.

32. Wheeler R. L., Bufe C. G., Johnson M. L., Dart R. L. Seismotectonic Map of Afghanistan, with Annotated Bibliography : Open-File Report 2005–1264. Reston : U.S. Geological Survey, 2005. 34 p.
33. Kalinin D. F., Egorov A. S., Bolshakova N. V. Oil and gas potential of the West Kamchatka coast and its relation to the structural and tectonic structure of the Sea of Okhotsk region based on geophysical data. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2022. No. 1(53). pp. 59–75.
34. Glazunov V. V., Ageev A. S., Gorelik G. D., Sarapulkina T. V. Results of comprehensive geophysical studies on the search for crypts on the territory of suburban necropolis of Tauric Chersonese in the Karantinnaya Balka. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 12–19.
35. Nedosekova I. L. Carbonatite complexes of the South Urals: Geochemical features, ore mineralization, and geodynamic settings. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 255. pp. 349–368.
36. Sadykova Z. I., Movchan I. B., Yakovleva A. A., Goglev D. A. Technology for integrated geological and geophysical interpretation of data obtained using UAVS on the example of a site in the Murmansk region. *Geology and Minerals of the West Ural : Collected Papers*. Perm, 2023. No. 6(43). pp. 161–169.

УДК 552.3:552.13:551.2(99)

ОЛИВИН-ШПИНЕЛЕВАЯ ГЕОТЕРМОМЕТРИЯ – ИНДИКАТОР ФОРМАЦИОННОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПОРОД И ОСНОВА ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РЕКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИДЫ*



И. В. ТАЛОВИНА¹,
зав. кафедрой, проф.,
д-р геол.-минерал. наук,
i.talovina@gmail.com



И. А. БАБЕНКО¹,
аспирант



Р. К. ИЛАЛОВА¹,
доцент, канд. геол.-минерал. наук



А. М. ДУРЯГИНА²,
канд. геол.-минерал. наук

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

² Институт минералогии Фрайбергской горной академии, Фрайберг, Германия

Введение

С середины XX в. различными специалистами была обоснована возможность использования закономерных изменений химических составов оливина и шпинели в геотермометрии ультрамафитов и мафитов [1–4]. С тех пор установлен комплекс геотермометров, отдельные из которых применяют и сегодня. Как правило, основная их часть использует коэффициент распределения железа и магния между оливином и шпинелью.

Приведены результаты изучения составов породообразующих и акцессорных минералов различных мафитовых и ультрамафитовых формаций. Рассчитаны и проанализированы температуры образования горных пород на основании четырех оливин-шпинелевых геотермометров для разных формаций ультрамафитов и мантийных ксенолитов на примере Антарктиды, Монголии, Урала и других регионов. Отмечено, что температуры оливин-шпинелевого равновесия в породах офиолитовых зональных и расслоенных массивов оказываются сопоставимыми, а в мантийных ксенолитах – повышенными по отношению к ним. Сделан вывод о применимости основных версий геотермометров для вычисления температур мафит-ультрамафитовых систем для реконструкции геодинамических условий формирования различных блоков земной коры. Рассмотрены некоторые типоморфные индикаторы формационной принадлежности горных пород, а именно: отношение Ni:Mn в оливине и железистость в хромшпинелиде.

Ключевые слова: геотермометрия, формации, ультрамафиты, мафиты, оливин, шпинель, Антарктида
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.12

В последнее время ряд отечественных и зарубежных геологов демонстрируют применимость данных геотермометрии при моделировании и реконструкции формирования различных участков земной коры [5]. Известно, что в разных геодинамических обстановках образуются разные формации ультрамафитов и мафитов. Таким образом, есть основания считать, что химические особенности составов породообразующих и акцессорных минералов этих пород будут различными. Интересным представляется опробование методов геотермометрии на породах ультрамафитовых и мафитовых комплексов Антарктиды, на территории которой выделяют все известные геодинамические обстановки [6–8]. Это позволит лучше понять геологическую природу этого региона и оценить его роль в общей картине глобальной

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024–0003. Фундаментальные междисциплинарные исследования геологических образований Антарктиды в районе станции Восток).