
НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.24:550.34(571.56)

Линеаментный анализ пространственного поля сейсмичности северного сегмента Амурской микроплиты

С.В. Трофименко^{*}, Г.З. Гильманова^{*}, В.М. Никитин^{**}, И.И. Колодезников^{***}

^{*}Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск

^{**}Южно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Нерюнгри

^{***}Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск

Изучено пространственное распределение аномалий гравитационного и магнитного полей и цифровых моделей рельефа на границе Амурской и Евразийской плит. Показано, что системы аномалий геофизических полей укладываются в регулярные пространственные структуры и контролируются линеаменентами широтного, долготного и диагонального простираний. В результате сопоставления диагональной системы аномалий геофизических полей с пространственным распределением поля современной сейсмичности и эпицентрами сильных землетрясений сделано предположение, что диагональная система линеаментов укладывается в зоны тектонических деформаций и контролирует эпицентральные поля современной. Основным результатом данного исследования является получение новых представлений о пространственном распределении эпицентров землетрясений центрального фрагмента Амурской плиты.

Ключевые слова: геофизические поля, цифровая модель рельефа, линеаменты, деформация земной коры, сейсмичность, землетрясения.

Lineament Analysis of Seismicity Spatial Field of the Northern Segment of the Amur Microplate

S.V. Trofimenko^{*}, G.Z. Gilmanova^{*}, V.M. Nikitin^{**}, I.I. Kolodeznikov^{***}

^{*}Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of RAS, Khabarovsk

^{**}South-Yakutian Scientific Center of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Neryungri

^{***}Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk

We studied the spatial distribution of anomalies of the gravitational and the magnetic fields and digital elevation model at the border between the Amur and the Eurasian plates. We have shown that that the systems of anomalies of geophysical fields fit into the regular spatial structures and are controlled by lineaments of latitude, longitude and diagonal stretch. As a result of comparing of diagonal system of geophysical fields anomalies with spatial distribution of the fields of contemporary seismicity and epicenters of strong earthquakes, an assumption was made that the diagonal system of lineaments fit into zones of tectonic deformation and has been controlling the epicentral fields. The main result of this study is the getting new ideas about the spatial distribution of earthquake epicenters of the central fragment of the Amur plate.

Key words: geophysical fields, digital elevation model, lineaments, crustal deformation, seismicity, earthquakes.

^{*}ТРОФИМЕНКО Сергей Владимирович – д.г.-м.н., в.н.с, e-mail: trofimenko_sergei@mail.ru; ^{*}ГИЛЬМАНОВА Гульшат Забировна – к.г.-м.н., с.н.с., e-mail: gigulya@yandex.ru; ^{**}НИКИТИН Валерий Мефодиевич – д.г.-м.н., директор, e-mail: anrsya@mail.ru; ^{***}КОЛОДЕЗНИКОВ Игорь Иннокентьевич – д.г.-м.н., проф., президент, e-mail: anrsya@mail.ru.

Введение

Начало теоретических исследований линейных структур и масштабных неоднородностей земной коры положено работами [1, 2], которые успешно развиваются на современном этапе, с использованием новых технологий анализа цифровых моделей как геофизических полей, так и рельефа [3–6]. Новые технологии позволяют не только проследить датировку заложения линейных элементов, а значит и геофизических полей в геологических масштабах времени, но и фактически отслеживать изменения в структуре линейных элементов вследствие воздействия на них сильных землетрясений [4].

Изучение тектонического строения и последующее обобщение структурно-геофизических и геологических материалов [7–11] позволило установить, что в центральном районе северного сегмента Амурской микроплиты линейные элементы и отражающие их аномалии геофизических полей образуют разнонаправленные системы ортогонального, северо-восточного и северо-западного простираний [12].

Эти линейные элементы на поверхности фиксируются в виде зон, мощностью до 15 км и протяженностью до нескольких сотен километров. Они имеют преимущественно северо-восточное (45–75°) и северо-западное (300–320°) простирания, вертикальное или крутонаклонное залегание плоскостей сместителей и контролируют положение полей гранитизации.

Наиболее интенсивно процессы перестройки структурного плана пространственных аномалий должны протекать в сейсмически-активных областях, в зонах взаимодействия тектонических плит и линейных элементов, разделяющих их [13].

Таким образом, изучение пространственной структуры геофизических полей является одним из научных направлений исследований в различных прикладных задачах структурной геологии, тектоники, металлогении, геодинамики и сейсмотектоники. Особую роль данные исследования приобретают в сейсмоактивных регионах.

Предварительные данные о геометрических построениях линейных структур Алданостанового мегаблока методами статистического анализа пространственного распределения геофизических полей изложены в работах [12, 14].

В данной работе поставлены задачи уточнения закономерностей в распределении пространственного поля сейсмичности по результатам линейного анализа в пределах зоны взаимодействия Амурской коровой и Евразийской литосферной плит. Сопоставление систем линейных элементов цифровых форм рельефа и геофизических полей для данной площади и распределения эпицентров землетрясений в различных

интервалах магнитуд позволило выявить ряд новых закономерностей сейсмического процесса.

Методика анализа

В основу моделирования пространственной структуры сейсмичности положен подход, основанный на допущении, что землетрясения, приуроченные к определенным структурам, являются следствием длительного развития самих структур. Следовательно, области эпицентров сильных землетрясений и рассеянной сейсмичности должны пространственно укладываться в активные деформационные структуры.

Для сопоставления пространственного распределения поля сейсмичности с модельными факторами рассматриваются два признака. Во-первых, производится сопоставление рассеянного поля сейсмичности и очаговых зон с положением и структурой грави- и магнитолинейных элементов. Во-вторых, рассматривается модель тополинейных элементов по материалам цифровых моделей рельефа.

Исходным материалом для исследований и обработки послужили: 1) цифровая модель рельефа SRTM-03, 2) цифровая модель аномального гравитационного поля в редукции Буге исходного масштаба 1:1 000 000.

SRTM-03 имеет следующие исходные характеристики: размер ячейки 3x3 секунды (примерно 90 м), проекция Lat/ Lon на эллипсоиде WGS 84 (World Geodetic System 1984) с исходной отметкой над уровнем моря, определяемой геоидом WGS84-EGM96 (Earth Gravitational Model). Абсолютные погрешности горизонтального позиционирования и высоты для Евразийского континента составляют 8,8 м и 6,2 м соответственно. Данные кодируются 16 битами, что позволяет представлять весь набор высот дискретностью 1 м.

Для поиска линейных элементов, анализа их ориентации и плотности использовалась методика LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical Analysis), реализованная в программе Win-LESSA [15]. Программа позволяет получать единообразное численное описание изображений различного типа схем, цифровых моделей рельефа, выявлять линейные элементы рисунка и описывать их свойства так, как это принято в геологических исследованиях. Это розидиagramмы плотности линейных элементов, протяженные линейные элементы, а также многие другие новые характеристики.

Суть обработки состоит в следующем. В процессе поиска линейных элементов в полутоновом изображении выделяются спрямленные участки границ областей разной яркости, в бинарном – оси линий, в цифровой модели рельефа

фа – спрямленные участки хребтов и долин. Анализ полученного при расчетах материала позволяет выявить распределение по исследуемой площади локально преобладающих направлений, однородные и аномальные по своим ориентационным свойствам области.

Расчеты по программе WinLESSA были проведены для цифровой модели рельефа, обработанной по специальной методике, и цифровой модели гравитационного поля. Методика основана на алгоритмах, выделяющих точки цифрового изображения с изменяющимися яркостью или другими неоднородностями, и сводится к применению фильтра выделения границ – вычислению модуля градиента рельефа. Применение такого фильтра к изображению существенно уменьшает количество обрабатываемых данных; отфильтрованная часть изображения считается менее значимой, а наиболее важные структурные свойства изображения сохраняются. Модуль градиента является наиболее эффективным инструментом для выделения линейных структур, т.к. в зонах разрывных нарушений почти всегда присутствуют пространственно вытянутые участки с близкими значениями градиентов. Кроме того, в любой точке экстремума значение модуля градиента близко к нулю, что позволяет в результате отчетливо выделять долины и хребты в виде протяженных линейных объектов [7].

Предварительные результаты моделирования показали [16, 17], что распределение эпицентров

землетрясений по площади не равномерно и имеет ряд закономерных распределений. Для центральной части северного сегмента Амурской микроплиты характерно изменение азимутов осевых линий плотности эпицентров землетрясений с магнитудами $2 < M < 4,9$ (рис.1).

Результаты компьютерного моделирования пространственной структуры геофизических полей и цифровых форм рельефа

Область, расположенная севернее Южно-Становой зоны разломов (рис.2), заполнена широким полем распределений эпицентров слабых землетрясений, параллельным активизированным структурам.

В то же время в более мелком масштабе вся область эпицентров имеет субмеридиональное простирание, т.е. ортогональное активизированным структурам. Восточнее 124° в.д. ориентировка области сгущения эпицентров слабых землетрясений подворачивается на восток, оставаясь, тем не менее, ортогональной системе активных разломов. Восточная часть представленной области по распределению плотности очагов землетрясений формируется под действием активных тектонических разломов северо-западной и северо-восточной ориентировок, согласных по простиранию морфоструктур. Данный результат послужил стимулом для дальнейших исследований структуры сейсмичности.

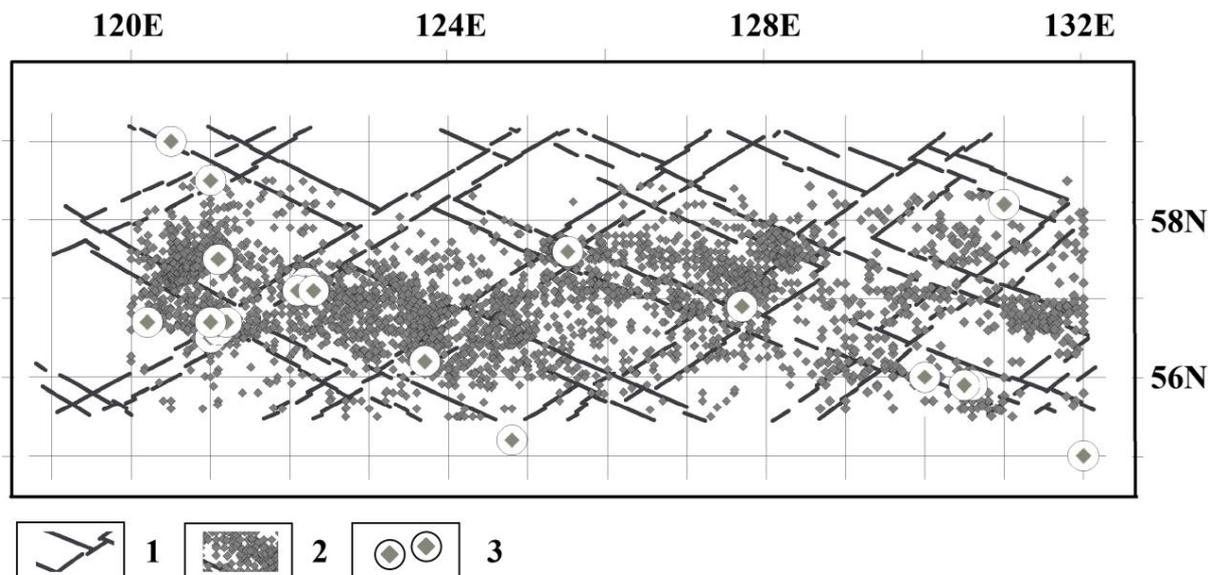


Рис.1. Фрагмент пространственной структуры доменов диагональной системы грави- и магнитолинеаментов геофизических полей с азимутами (40–310) с эпицентрами землетрясений: 1 – линеаменты системы аномалий геофизических полей в азимутах (40–310); 2 – пространственное поле эпицентров землетрясений с магнитудами $2 < M < 4,9$; 3 – сильные землетрясения с магнитудами $M > 5$

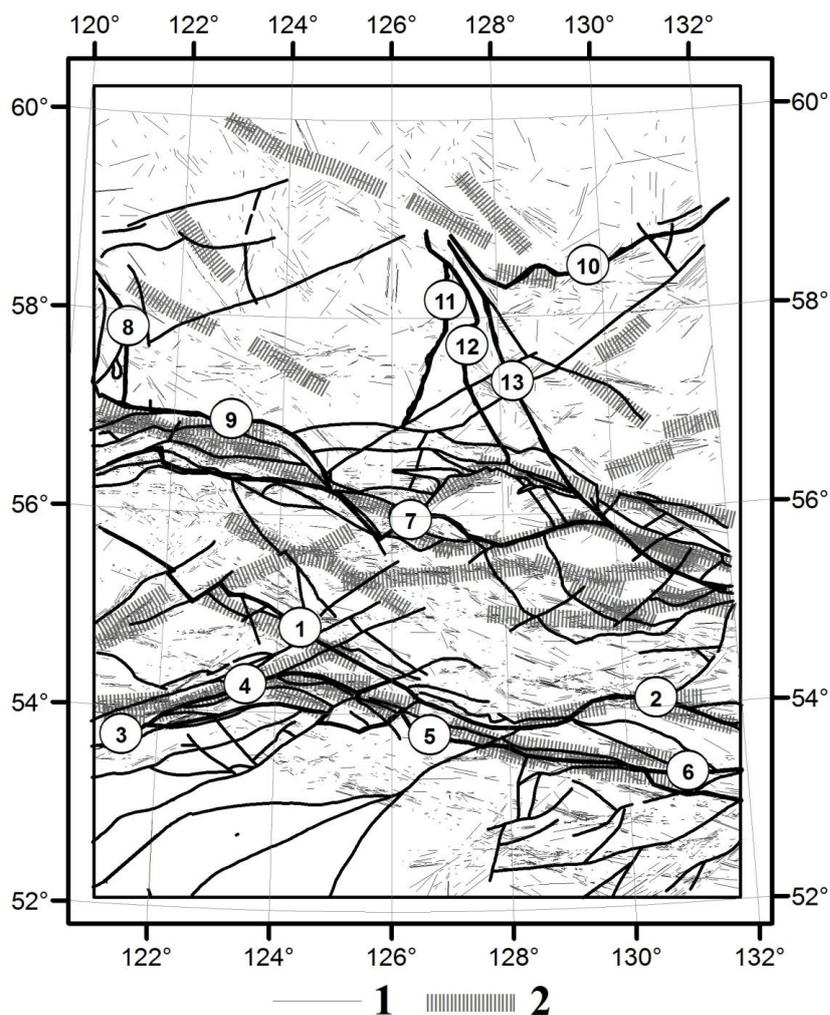


Рис.2. Система гравитационных и активных разломов центральной части Алдано-Станового мегаблока:
 Разломы (цифры в кружках): 1 – Желтулакский; 2 – Ланский; 3 – Монголо-Охотский; 4 – Северо-Тукурингрский; 5 – Южно-Тукурингрский; 6 – Тугурский; 7 – Становой; 8 – Тарын-Темулякитский; 9 – Южно-Якутский; 10 – Чагда; 11 – Тимптонский; 12 – Нуамский; 13 – Тыркандинский. Линеаменты гравитационного поля: 1 – все; 2 – основные

Для изучения линеаментных структур Алдано-Станового мегаблока по распределению геофизических полей и цифровых форм рельефа были применены современные компьютерные технологии корреляционного анализа, в результате которых исходные карты аномалий трансформируются в системы линеаментов. По сравнению с исходными картами гравитационного и магнитного полей и цифровых форм рельефа схемы их линейных элементов обладают тем преимуществом, что сохраняют только ориентировку, протяженность и местоположение особенностей аномалий, что отражает линейные тектонические и стратиграфические контакты комплексов пород с разными физическими свойствами.

Сравнительный анализ пространственного распределения эпицентров землетрясений и

разработанной модели грави- и магнитолинеаментов Алдано-Станового мегаблока показал, что в систему линеаментов с азимутами (40–310°) укладывается структура сейсмического поля, а к узлам, образованным пересечением линеаментов данной системы, либо к ее осевым линиям, тяготеют все эпицентры сильных землетрясений (рис.1).

Простирание зон сгущения эпицентров землетрясений западного фрагмента имеют общий азимут 310°, а далее, при переходе из одного домена в другой, последовательно меняет азимут 310° на 40°, с 40° на 310°.

Рассчитанная структура тополинеаментов по изложенной выше методике (рис.3) показала полную идентичность структуре грави- и магнитолинеаментов (рис.1) как по азимутам (40–310°), так и по доменной структуре.

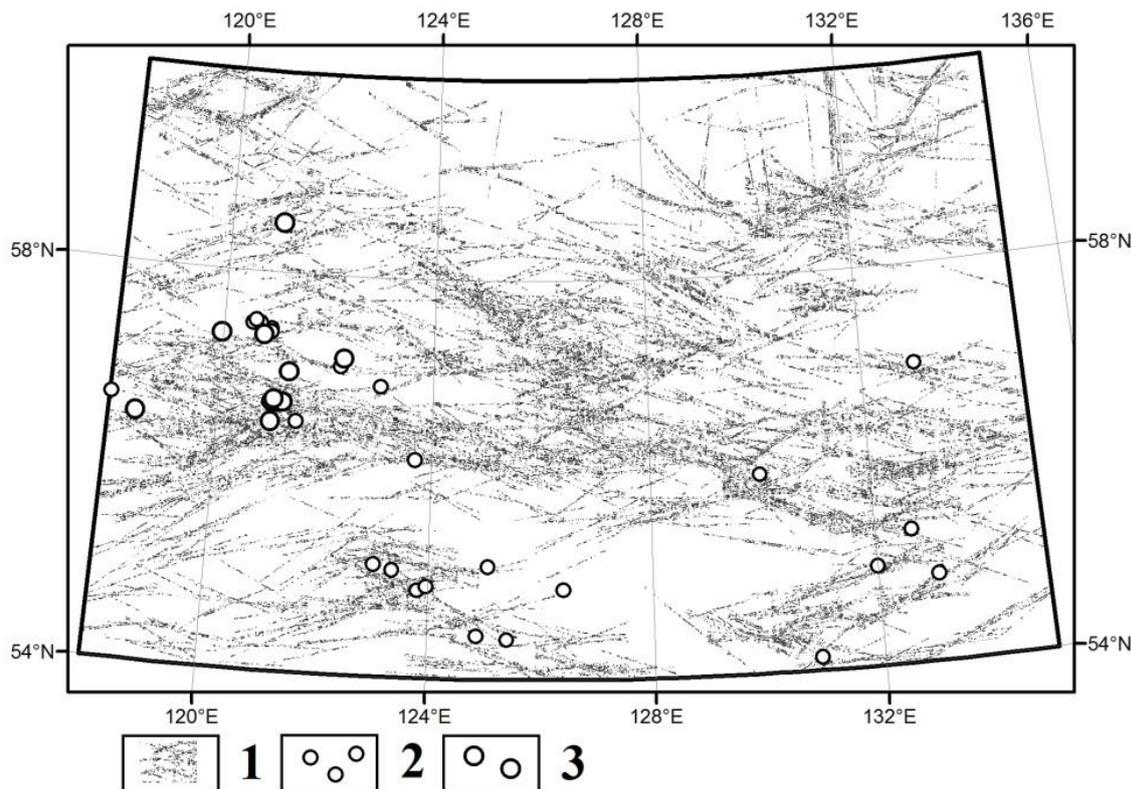


Рис. 3. Линейные элементы геологических структур цифровой модели модуля градиента рельефа:

1 – линейные элементы площади исследований; 2 – эпицентры землетрясений с магнитудой от $M=5$ до $M=6$; 3 – эпицентры землетрясений с магнитудой $M>6$

Все сильные землетрясения с магнитудами $M>5$ приурочены либо к зонам сгущения тополинеаментов, либо к отдельным тополинеаментным структурам. По крайней мере нет ни одного сейсмического события в зонах малой плотности тополинеаментов.

В данном случае мы рассматриваем качественные модели. Построение формализованных моделей с расширением интервалов магнитуд требует разработки корреляционных моделей между плотностью распределения эпицентров землетрясений слабой сейсмичности и плотностью тополинеаментов и является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, полученные закономерности позволяют предположить, что система линеаментов в азимутах ($40\text{--}310^\circ$) может быть ассоциирована с зонами активного деформирования земной коры в настоящее время и контролирует сейсмический процесс в пределах зоны конвергентного взаимодействия Амурской коровой и Евразийской литосферной плит.

Сопоставление результатов данного исследования с результатами моделирования авторов [6] гравитационного поля в редукции Буге, выполненного по методике анализа цифровых по-

лей, показало соответствие основных структурных «гравитационных» линеаментов в азимутах 64 и 296° . В совокупности результаты данных модельных построений обобщают результаты и выводы предшествующих работ (рис.2).

Заключение

В данном исследовании представлены результаты статистического анализа пространственного распределения аномалий гравитационного и магнитного полей области конвергентного взаимодействия Амурской и Евразийской плит [18, 19]. Данная область является сейсмически-активным регионом Северо-Востока Азии, энергетический потенциал отдельных фрагментов которой коррелирует десятибалльным зонам сейсмических сотрясений.

Установлено, что в пределах Алдано-Станового мегаблока данные линейные зоны укладываются в определенные, строго ориентированные в пространстве сети индикаторов разломов (линеаментов), или системы, каждая из которых включает два взаимортогональных направления, образуя доменные структуры. Протяженность стороны доменов составляет для разных систем от 120 до 150 км и условно

названа пространственным периодом первого порядка.

В результате сопоставления диагональной системы аномалий геофизических полей с пространственным распределением полей современной сейсмичности и эпицентрами сильных землетрясений сделано предположение, что диагональная система линеаментов отражает зоны тектонических деформаций и контролирует эпицентральные поля современной сейсмичности.

Определяющим результатом данного исследования является обобщение материалов ранних научных работ и получение новых представлений о геофизических моделях и цифровых моделях земной коры Алдано-Станового мегаблока в пределах северо-восточного сегмента Амурской коровой плиты.

Основное направление дальнейших исследований – разработка тектонической основы систем линеаментов на основе новых технологий моделирования цифровых форм рельефа и проведение линеаментного анализа геофизических полей восточного сегмента Алдано-Станового мегаблока.

Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной программы (проект № 16-17-00015) при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00097а и государственного задания №5.1771.2014/К Министерства образования и науки России.

Литература

1. *Hobbs W.N.* Lineaments of the Atlantic border region // *Bull. Geol. Soc Amer.* 1994. Vol. 15. P. 483–506.
2. *Hubbert M.K.* Theory of scale models as applied to the study of geologic structures // *Geological Society of America Bulletin.* 1937. Vol. 48. P. 1459–1520.
3. *Анохин В.М., Одесский И.А.* Характеристики глобальной сети планетарной трещиноватости // *Геотектоника.* 2001. №5. С. 3–9.
4. *Arellano-Baeza A.A., Zverev A.T., Malinnikov V.A.* Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data // *Advances in Space Research.* 2006. Vol. 37. Issue 4. P. 690–697, doi:10.1016/j.asr.2005.07.068.
5. *Анохин В.М., Маслов Л.А.* Закономерности направленности линеаментов и разломов дна российской части Японского моря // *Тихоокеанская геология.* 2009. № 2. С. 3–16.
6. *Gilmanova G.Z., Shevchenko B.F., Rybas O.V. et al.* Linear geological Structures of the Southern Aldan-Stanovoi Shield and Eastern Central-Asian Foldbelt: the geodynamic aspect // *Russian Journal of Pacific Geology.* 2012. Vol. 6, № 1, P. 52–60, doi: 10.1134/S1819714012010058.
7. *Рыбас О.В., Гильманова Г.З.* Применение теории масштабируемого пространства для выделения и анализа структур рельефа по радиолокационным данным // *Исследование Земли из космоса.* 2011. № 6. С. 45–52.
8. *Статива А.С., Трофименко С.В., Гриб Н.Н.* Анализ существующих представлений о тектонике Алданского щита // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2006А. Т. 17, № 3, С. 167–189.
9. *Стогний В.В., Стогний Г.А.* Тектоническая расслоенность Алдано-Станового геоблока. Новосибирск: Наука, 1997. 151 с.
10. *Попов Н.В., Смелов А.П.* Метаморфические формации Алданского щита // *Геология и геофизика.* 1996. Т. 37, № 1. С. 148–161.
11. *Трофименко С.В.* Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // *Тихоокеанская геология.* 2010. Т. 29, № 3. С. 64–77.
12. *Статива А.С., Трофименко С.В., Имаев В.С.* Пространственное распределение индикаторов систем разломов Алданского щита // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2006В. Т. 17, № 4, С. 188–197.
13. *Helena C. Lima Neto, Joaquim M. Ferreira, Francisco H.R. Bezerra et al.* Earthquake sequences in the southern block of the Pernambuco Lineament, NE Brazil: Stress field and seismotectonic implications // *Tectonophysics.* 2014. 21 October. Vol. 633. P. 211–220. doi:10.1016/j.tecto.2014.07.010.
14. *Статива А.С., Трофименко С.В.* Построение систем разломов Алданского щита по геофизическим данным // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2006. Т. 17. №3. С. 193–198.
15. *Zlatopolsky A.* Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // *Computers&Geosciences.* 1997. Vol. 23, № 1. P. 45–62.
16. *Трофименко С.В., Гриб Н.Н., Никитин В.М., Статива А.С.* Интерпретация статистической модели аномалий гравимагнитных полей Алданского щита // *Наука и образование.* 2011. №1. С.40–45.
17. *Пушкаревский Ю.С., Трофименко С.В., Маршалова В.Е., Гриб Н.Н.* Отражение пространственного поля сейсмичности в геофизических полях и фрактальных моделях Олекмо-Становой сейсмической зоны // *Наука и образование.* 2012. №2. С.15–18.

18. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. и др. Буферные сейсмогенные структуры между Евразийской и Амурской литосферными плитами на юге Сибири // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 22, № 6. С. 55–61.

19. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмогеодинамика Алдано-Станового блока // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31, № 1. С. 5–17.

Поступила в редакцию 27.09.2015

УДК 551.7:550.838.5:551.2

Палеомагнетизм докимберлитовых даек долеритов Вилюйско-Мархинской зоны разломов (Якутская алмазоносная провинция)

К.М. Константинов^{***}, Ш.З. Ибрагимов^{***}, И.К. Константинов^{**},
А.А. Яковлев^{*}, Е.В. Артемова^{*}, Р.В. Монхоров^{*}

^{*} Научно-исследовательское геологоразведочное предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный

^{**} Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

^{***} Казанский федеральный университет, г. Казань

На действующих месторождениях АК «АЛРОСА» (ПАО) Мир и Нюрбинская Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) проведены петро- и палеомагнитные исследования долеритов из докимберлитовых даек вилюйско-мархинского интрузивного комплекса. Принципиальные различия долеритов двух месторождений наблюдаются по значениям магнитной восприимчивости α , естественной остаточной намагниченности (ЕОН) и фактору Q . Для долеритов карьера Нюрбинский фактор $Q=1,31$ значительно повышеи по сравнению с другими базитами среднего палеозоя ($Q<0,8$). Его можно рассматривать в качестве петромагнитного маркера картирования дорудных даек в составе Вилюйско-Мархинской зоны разломов. Результаты магнитоминералогических исследований свидетельствуют о перспективности изученных долеритов для палеомагнитных исследований: анизотропия магнитной восприимчивости соответствует морфологии тел – «дайковому» типу, основные носители намагниченности – титаномагнетиты практически не окисленные (первичные), а их доменная структура относится к псевдооднодоменной области ферромагнитных частиц. В изученных образцах установлены отрицательные векторы характеристической ЕОН, которые образуют два самостоятельных кластера в первой четверти стереограммы. По каждому из них рассчитан палеомагнитный полюс, который сопоставлен с траекторией кажущейся миграции полюса Сибирской платформы. Палеомагнитное датирование показало, что внедрение мирнинской и нюрбинских даек происходило в разное время, соответственно, 380 млн лет (поздний девон) и 420 млн лет (поздний силур–ранний девон). Возможно, они относятся к двум разным интрузивным ролям даек. Первый соответствует аптаинскому событию – времени излияния базальтов (фран, 375–385 млн лет) и хорошо согласуется с данными абсолютного возраста прорывающих дайку кимберлитов трубки Мир (фамен, 360–375 млн лет). Палеомагнитная дата второго практически совпадает с полюсами кимберлитовых трубок Нюрбинская и Ботубинская, что свидетельствует о незначительной разнице во времени их внедрения. Полученные данные подтверждают существование на территории ЯАП в среднем палеозое двух эпох кимберлитовнедрения: позднесилурийской-раннедевонской (S_2-D_1) и позднедевонской-раннекарбоновой (D_3-C_1).

Ключевые слова: Якутская алмазоносная провинция, Вилюйско-Мархинская зона разломов, трубка Мир, трубка Нюрбинская, кимберлиты, дайки долеритов, палеомагнетизм.

^{***} КОНСТАНТИНОВ Константин Михайлович – д.г.-м.н., зав. лаб., e-mail: konstantinovKM@alrosa.ru;
^{**} ИБРАГИМОВ Шамиль Зарифович – к.г.-м.н., доцент, e-mail: shamil.Ibragimov@kpfu.ru; ^{*} КОНСТАНТИНОВ Иннокентий Константинович – ст. лаборант, e-mail: geologiaforever@mail.ru; ^{*} ЯКОВЛЕВ Андрей Андреевич – м.н.с., e-mail: yandrey1989@mail.ru; ^{*} АРТЕМОВА Елена Владимировна – инженер, e-mail: artemovaEV@alrosa.ru; ^{*} МОНХОРОВ Ричард Владимирович – инженер, e-mail: monhorovRV@alrosa.