

Карта постоянного естественного электрического поля России

А. Н. Дмитриев

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия
e-mail: dmitriev38@inbox.ru

Аннотация. На примерах наблюдения естественного электрического потенциала на поверхностях вулканов показана его прямая связь с динамикой температуры вулканов. Если более нагрета верхняя часть вулкана, то регистрируются положительные аномалии потенциала, и наоборот, при более нагретой нижней части вулканов регистрируются отрицательные аномалии того же потенциала. В то же время протекающие на больших глубинах температурные процессы, как правило, тесно связаны с долгоживущими глубинными разломами. Поэтому наблюдения естественного потенциала над этими разломами позволят непосредственно контролировать динамику глубинных температурных процессов. Учитывая это новое направление метода естественного потенциала и его эффективное применение при поисках руд цветных металлов, возникает необходимость создания единой карты естественного электрического потенциала России. В результате мелкомасштабная карта позволила бы более точно оконтуривать рудные поля и целенаправленно вести поиски ранее не обнаруженных залежей металлических руд. Кроме того, с помощью мелкомасштабной карты было бы возможным наиболее точно проследить развитие зон глубинных тектонических разломов и исследовать их на связь с вулканической деятельностью и сейсмическими событиями. Для изучения и контроля совершения сейсмических событий предложен способ годографа естественного электрического потенциала.

Ключевые слова: температурная динамика вулканов; глубинные разломы; карта естественного потенциала; прогнозирование сейсмических событий; годограф естественного потенциала

The map of permanent natural electric field of Russia

Arkadiy N. Dmitriev

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
e-mail: dmitriev38@inbox.ru

Abstract. The article describes a direct connection between the natural electric potential and the dynamics of the temperature of volcanoes using the examples of observation of the natural electric potential on the surfaces of volcanoes. If the upper part of the volcano is hotter, positive potential anomalies are recorded, and conversely, if the lower part of the volcanoes is hotter, negative anomalies of the same potential are recorded. At the same time, the temperature processes occurring at great depths, as a rule, are closely related to long-lived deep faults. Therefore, observations of the natural potential over these faults will allow controlling the dynamics of deep temperature processes. Given this new direction of the natural potential method and its effective application in the search for non-ferrous metal ores, there is a need to create the map of the natural electrical potential of Russia. As a

result, small-scale map would allow us more precise limitation of ore fields and purposefully search for previously undiscovered deposits of metal ores. In addition, a small-scale map would make it possible to most accurately track the development of deep tectonic fault zones and to study them in relation to volcanic activity and seismic events. In this regard, the method of natural electric potential hodograph is considered as one of the possible ways to predict seismic events.

Key words: temperature dynamics of volcanoes; deep faults; the map of natural potential; prediction of seismic events; hodograph of natural potential

Введение

Существуют различные карты физических полей Земли для России: гравитационные, магнитные, температурные и др., но отсутствует карта постоянного естественного электрического потенциала, основу которой могут составлять измерения методом естественного электрического поля (ЕЭП) на поверхности Земли. Необходимость такой карты может быть объяснена тем, что аномалии естественного электрического потенциала с амплитудой $-0,1...-0,7$ В, как правило, наблюдаются над залежами рудных минералов [1, 2], а с амплитудой $-1...-10$ В — над глубинными разломами, заполненными графитистыми (часто сульфидизированными) породами [3–8]. В перспективе с помощью такой карты представлялось бы возможным более успешно устанавливать границы рудных полей и целенаправленно вести поиски необнаруженных или ранее пропущенных залежей металлических руд. Кроме того, с помощью карты было бы возможным наиболее точно проследить развитие зон глубинных тектонических разломов и исследовать их на связь с вулканической деятельностью и сейсмическими событиями. В результате у метода ЕЭП появилась бы новая и исключительно важная роль в области познания температурного поля внутренних оболочек планеты Земля и его динамики, влияющей на активность вулканотектонических процессов и их мест проявления на дневной поверхности в виде землетрясений.

Результаты наблюдений естественного электрического потенциала на поверхностях действующих вулканов и их подножий

В этой связи представляет интерес рассмотреть следующие материалы по методу ЕЭП.

По данным авторов [9] (рис 1 А) следует, что положительные амплитуды естественного потенциала U_{Σ} наблюдаются над разломными трещинами (fissures) и их динамика прямо связана с ростом или понижением температуры (T_i) на выходе разлома (416 мВ — 1983 г., 368 мВ — 1985 г., 339 мВ — 1987 г., 432 мВ — 1994 г.).

Данные автора [10] (рис. 1 Б, В) позволяют получить информацию о структуре и интенсивности естественного электрического поля не только в зоне вулкана, но и на расстояниях близких к фоновым. В результате между этими крайними точками полная амплитуда составляет 5 В. Мониторинг потенциала вблизи кратера показал, что в 2001 и 2002 гг. его величина составляла 900 мВ и была предельно стабильна, но уже в сентябре 2003 г. наблюдался его рост до 1 100 мВ, а затем через полмесяца было зафиксировано резкое падение до 700 мВ. Это обстоятельство указывает на большую перспективность метода ЕЭП контролировать динамику температуры аномального объекта за счет высокой чувствительности естественного электрического потенциала к изменениям температуры объекта, на что указывает и автор этих материалов [10].

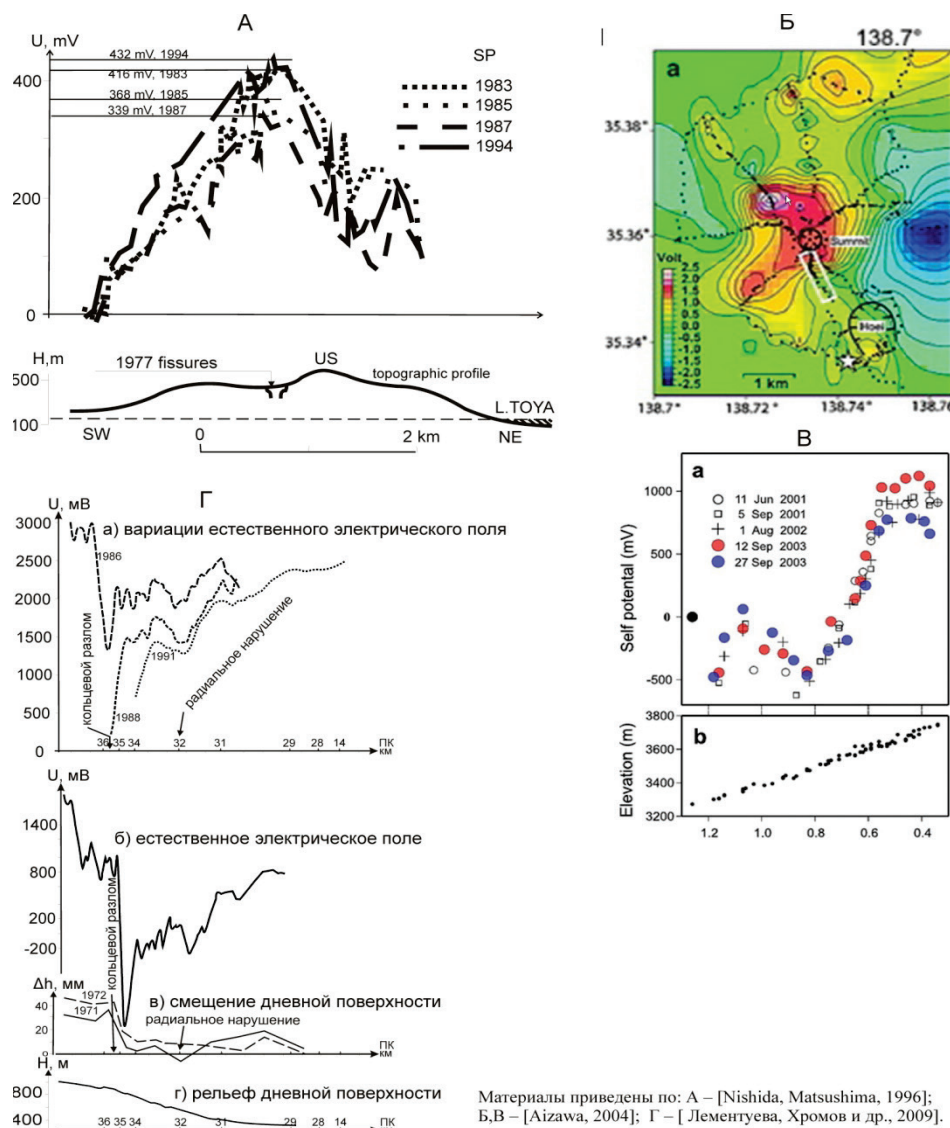


Рис. 1. Результаты мониторинга естественного электрического потенциала на территориях вулканов: А) годовые изменения аномалии SP вдоль профиля СВ-ЮЗ через вулкан Usu (Япония); Б) карта SP вулкана Fuji (Япония); В) годовые изменения аномалии SP по одному из профилей (белый прямоугольник на карте Б) вулкана Fuji; Г) годовые изменения аномалии естественного электрического поля (SP) в районе вулкана Авача (Камчатка)

Данные по Камчатке [11] (рис. 1 Г) показывают, что изменения естественного электрического потенциала на склоне вулкана над разломами также имеют высокую динамику, но аномалии потенциала над этими тектоническими структурами фиксируются с отрицательным знаком. А это значит, что отрицательный знак является индикатором динамики более высокой температуры не в верхней, а в нижней, более глубокой части изучаемых аномальных объектов. Авторы [11] указывают на необходимость продолжения работ методом ЕЭП, связывая это с его ожидаемой высокой информативностью при изучении глубинных процессов Земли.

Важно отметить, из вышеприведенных данных различных авторов следует, что, несмотря на одинаковость температурной природы аномалий естественного потенциала, знаки этих аномалий различны. Это объясняется тем, что положительные аномалии естественного потенциала, как правило, обусловлены наибольшим прогревом верхней части аномального объекта, тогда как отрицательные аномалии обусловлены прогревом нижней части объекта.

Таким образом, регистрируемые на дневной поверхности над электропроводящими образованиями естественные электрические потенциалы (U_{Σ}) соответствуют полям собственных электродных потенциалов этих проводников U_0 (в частности, для графита $U_0 = 0,04$ В) и наложенных с соответственным знаком термопотенциалов (ΔU^T), генерируемых существующим геотемпературным полем,

$$U_i = U_{\Sigma} = U_0 + \Delta U^T. \quad (1)$$

Именно эти термопотенциалы и определяют знаки полюсов поляризованного электронного проводника: при менее нагретой его верхней части (обычная ситуация) аномалия потенциала, наблюдаемая на дневной поверхности, регистрируется как отрицательная (см. рис. 1 Г), и наоборот, при более нагретой — положительная (см. рис. 1 А, Б).

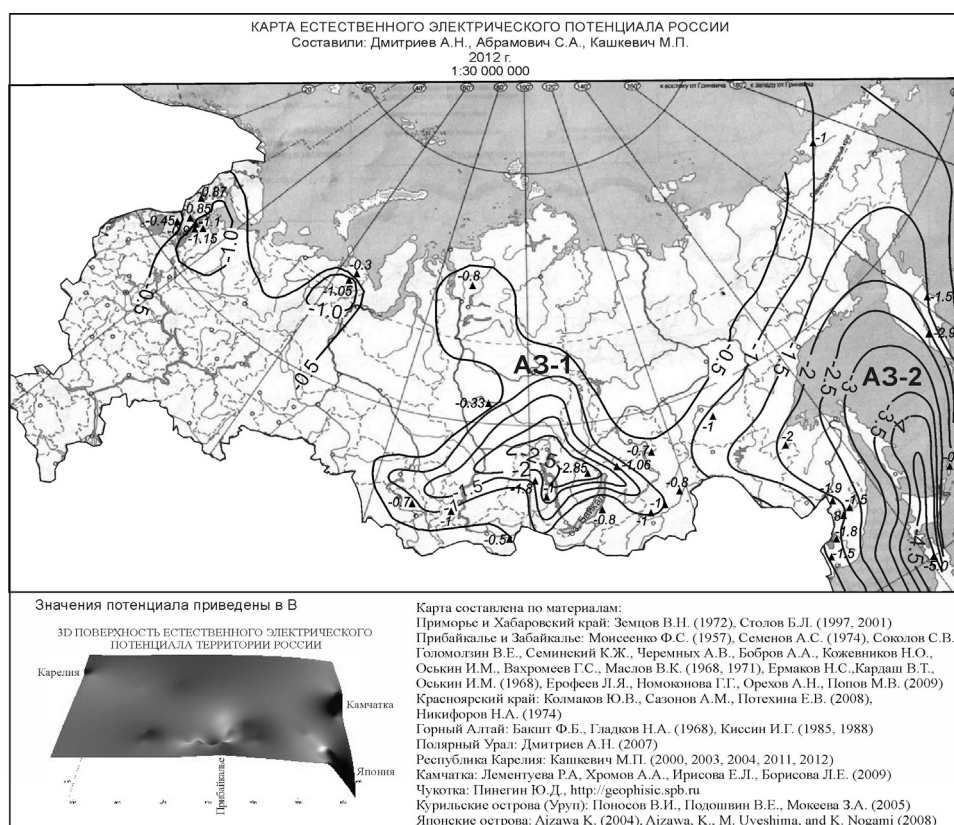


Рис. 2. Карта естественного электрического потенциала России (пилотный вариант)

Построение карты естественного электрического потенциала России

Прежде чем приступить к построению карты, необходимо предварительно определиться с ее классификацией. Надо полагать, что первой картой, по логике вещей, должна быть специальная тематическая (геофизическая) мелко-

масштабная карта с вынесенными на топографической основе числовыми значениями естественного электрического потенциала U и проведенными по ним изолиниями (рис. 2). В выполненной таким образом карте устанавливаются две региональные зоны, представленные отрицательными аномалиями естественного потенциала, АЗ-1 и АЗ-2.

Первая из них (АЗ-1) характеризуется потенциалом U в интервале $-1...-2,85$ В [12] с эпицентром в Прибайкалье и впервые была названа Байкало-Саянской аномальной зоной естественного электрического потенциала [13]. Ее западное крыло имеет более резкий градиент потенциала, переходящий в спокойное слегка пониженное нормальное поле в районе Салаирского кряжа и Рудного Алтая.

Кроме того, ее контур близко совпадает с Байкало-Саянской температурной аномалией, которая, в свою очередь, достаточно хорошо соответствует местоположению Байкало-Монгольского мантийного плюма [14] и Байкальского рифта, расположенного в поле растяжения и упругих напряжений Земли [15]. В границах этих аномалий постоянно происходят землетрясения с интенсивностью до 5...9 баллов: 2003 г. — в южной части Алтае-Саянской области; 2008, 2009 и 2010 гг. — на Байкале и на территории Бурятии; 2011–2012 гг. — в Туве; 2013 г. — в р-не г. Абакана.

Как видно из рисунка 3, этот сейсмический район является одним из самых активных в азиатской части России. Если сравнить территориально контур этого района с Байкало-Монгольским плюмом, становится ясно, что они оба тесно связаны с Байкальской рифтовой зоной — самой древней и крупнейшей системой разломов нашей планеты. Очевидно, что Байкало-Саянская температурная аномалия, отображаемая высокими значениями естественного потенциала, также, несомненно, обусловлена активным и напряженным состоянием этого участка земной коры.



Рис. 3. Районы распространения землетрясений в России
(по материалам <http://geo-tour.net/Interesting/zemletryas.htm>, 2011 г.)

Как видно, аномалия потенциала АЗ-1 линейно вытягивается вдоль перпендикулярно ориентированных двух осей в северном и западно-восточном направлениях. Судя по всему, первое направление соответствует простиранию

(вдоль длины) рифта, тогда как второе направление близко совпадает с основным растягивающим субгоризонтальным напряжением рифта, ориентированным перпендикулярно от краев рифта.

Вторая зона (АЗ-2) характеризуется потенциалом U_{Σ} в интервале $-1 \dots -10$ В и приурочена к восточной островной дуге Тихоокеанского кольцевого пояса [15]. Как видно из рисунка 2, вытянутость аномальной зоны наблюдается вдоль простираения японо-курильской островной дуги. К сожалению, из-за отсутствия данных со стороны китайской территории возможность картирования субгоризонтального сжатия на площади существующей субдукции отсутствует.

Следует заметить, что в Кордильеро-Андской подвижной зоне субдукции того же Тихоокеанского кольцевого пояса фиксируются высокоаномальные значения естественного электрического потенциала от $-1,842$ В до $-10,2$ В [16, 17]. Поэтому есть основания полагать, что эта зона вдоль своего простираения будет также надежно прослеживаться в естественном электрическом поле.

Следует обратить внимание и на другой факт. На Полярном Урале в 5-летний период наблюдений естественного электрического потенциала было установлено незначительное, в пределах 5 %, уменьшение (а не увеличение) амплитуды потенциала [13]. Это может быть объяснено существующим процессом остывания корневой части Полярного Урала. При рассмотрении сейсмичности этой части Урала (см. рис. 3) трудно найти другое объяснение.

Таким образом, на основе фактических данных по измерениям аномальных значений естественного электрического потенциала U_{Σ} в различных точках планеты следует с большой долей вероятности считать, что интенсивность этих аномалий определяется рядом факторов. К основным из них по достаточному количеству выделяемого тепла относятся места плавления базальтов с сопровождением вулканической деятельности, работа сил сжатия — растяжения земной коры, землетрясения. Проявление этих факторов за счет перехода механо-тектонической энергии в тепловую неизбежно сопровождается аномальными температурными полями вертикальной и горизонтальной ориентации. Все это совершается в границах зон долговременно живущих глубинных разломов. Поэтому эти разломы имеют все основания стать, с помощью измерений над ними естественного электрического потенциала U_{Σ} , основным инструментом для прямой индикации температуры глубоких частей земной коры, которая до сих пор определяется только косвенными способами.

В частности, для эффективного наблюдения за динамикой температуры и ее математического анализа следует измерения естественного электрического потенциала представлять в виде его годографа (рис. 4). Под годографом естественного электрического потенциала понимается связь амплитуды потенциала с временем и координатами его наблюдения $\Gamma U_{\Sigma} = f(t, x, y, z)$. Этот годограф удобно представлять, как и в сейсморазведке, в виде графика (см. рис. 4 а). По горизонтальной оси откладывается время (годы, месяцы, часы), по вертикальной — амплитуда потенциала (В, мВ).

С помощью годографа ΓU_{Σ} определяется скорость изменения потенциала v_U в выбранном промежутке времени Δt

$$v_U = \Delta U_{\Sigma} / \Delta t, \text{ (мВ/год, мВ/м-ц, мВ/сутки)} \quad (2)$$

Так, например, в период с ноября по декабрь 2012 г. включительно v_U составила 207,9 мВ/м-ц или 6,8 мВ/сутки (см. рис. 4 а). Одновременно с этим вычисляется угол наклона годографа θ_i в выбранном интервале времени по формуле

$$\theta_i = \text{artg} \frac{bc}{ac}, \text{ град.} \quad (3)$$

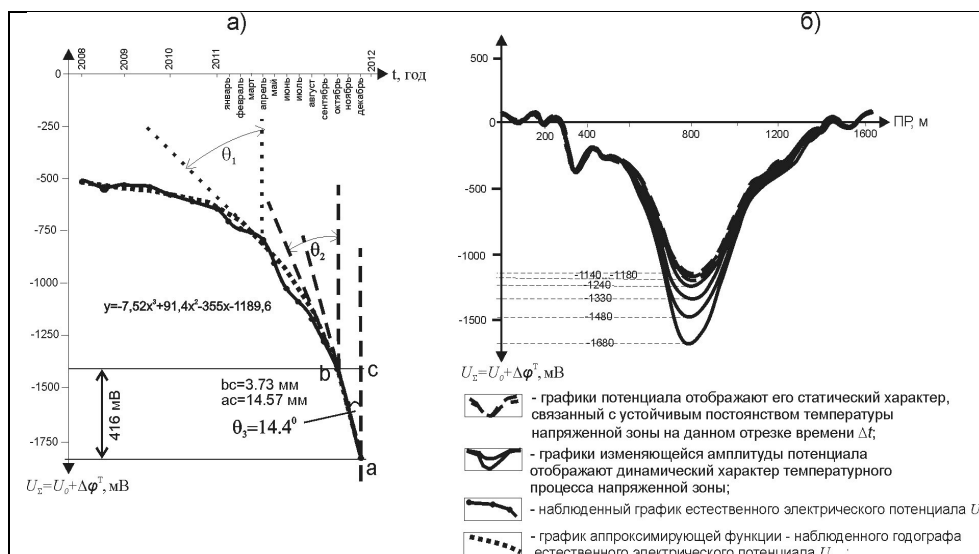


Рис. 4. Результаты наблюдений за динамикой естественного электрического потенциала над ГТЭЭ: а — годограф естественного потенциала, построенный для отрезка времени в 4 года; б — совмещенные графики естественного электрического потенциала, наблюдаемые, согласно расписанию, в заданные интервалы времени

Приведенные параметры v_U и θ_i определяются с меньшей погрешностью при расчетах с использованием тренда годографа, который, как в данном примере, является полиномом третьей степени $y = ax^3 + bx^2 - cx - d$. Последний способствует устранению влияния случайных отклонений при измерениях потенциала U_Σ . При накоплении результатов наблюдений и опыта учитываем динамику температуры T_2 , вычисляемой по формуле

$$\frac{e^2 n l (U_\Sigma - U_0)}{\sigma \beta p_F} = T_2^{1.2} - T_2, \quad (4)$$

где e — заряд электрона, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; n — концентрация электронов в единице объема проводника, м^{-3} ; l — средняя длина дрейфа электронов, м; σ — электропроводность проводника, $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$; β — коэффициент термоэдс, $\text{В} \cdot \text{град}^{-1}$; p_F — импульс Ферми, $\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$.

Представляется возможным, с привлечением данных других геофизических способов, устанавливать критичность величин v_U и θ_i . Их использование в комплексе с другими данными может способствовать улучшению прогноза относительно наступления тех или иных нежелательных событий: землетрясения, извержения вулканов и др.

Выводы

Проведенные измерения естественного электрического потенциала на склонах и подошвах вулканов показали, что амплитуда потенциала прямо зависит от величины температуры, приложенной к объекту, над которым ведутся наблюдения. В то же время знак аномалии потенциала всегда положительный, если объект исследования нагрет в своей верхней части, и отрицательный, если объект нагрет в нижней части.

Построена пилотная мелкомасштабная карта естественного электрического потенциала России. В результате в ее восточной части установлены две региональные аномальные зоны естественного электрического потенциала, приуроченные к глубоко погруженным напряженным блокам пород.

Рассмотрен способ годографа естественного электрического потенциала, позволяющий изучать и контролировать динамику сейсмических событий, обязанных глубинным температурным процессам.

Библиографический список

1. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1974 – 392 с.
2. Свешников Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. – Л.: ЛГУ, 1967. – 160 с.
3. Жамалетдинов А. А. Графит в земной коре и аномалии электропроводности // Физика Земли. – 1996. – № 4. – С. 12–29.
4. Жамалетдинов А. А. Электропроводность земной коры территории России и сопредельных стран // Вопросы геофизики. – 2006. – Вып. 39. – С. 69–90.
5. Вольфсон Ф. И., Яковлев П. Д. Структуры рудных полей и месторождений. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
6. Копылов М. И. Физико-геологические модели формирования рудоносных систем юга Дальнего Востока России: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2010. – 293 с.
7. Золото в «черных сланцах» Урала / В. Н. Сазонов [и др.] // Литосфера. – 2011. – № 4. – С. 70–92.
8. Керимов Р. Б. Типоморфные особенности золоторудной минерализации в черносланцевых комплексах южного склона Большого Кавказа и ее перспективы (Азербайджан) // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований: материалы Всеросс. конф. (Москва, 29–31 марта 2010 г.). Том 1. – М.: ИГЕМ, 2010. – С. 237–240.
9. Nishida Y., Matsushima N., Goto A. Self-Potential Studies in Volcanic Areas(3): Miyake-jima, Esan and Usu // Journal of the Faculty of Science. Series 7, Geophysics. – Vol. 10, Issue 1. – 1996. – P. 63–77.
10. Aizawa K. A large self-potential anomaly and its changes on the quiet Mt. Fuji, Japan // Geophysical Research Letters. – 2004. – Vol. 31. – Available at: <https://doi.org/10.1029/2004GL019462>.
11. Общие закономерности естественных электрических полей и их связь с геотектоническими структурами (Камчатка) / Р. А. Лементуева [и др.] / Тектонофизика и актуальные вопросы о Земле. К 40-летию создания М. В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН: материалы докладов Всеросс. конф. В 2 томах. – М.: ИФЗ, 2009. – Т. 2. – 451 с.
12. Оськин И. М. Результаты геофизических поисков марганцевого оруденения в Присяянье // Труды Иркутского политехнического института. Сер. геофиз. – 1968. – Вып. 51. – С. 74–80.
13. Дмитриев А. Н. Геолого-геофизические основы поисков электрически поляризованных объектов — нефтяных и рудных залежей (на примере Западной Сибири): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Тюмень, 2002. – 280 с.
14. Зорин Ю. А., Турутанов Е. Х. Региональные изостатические аномалии силы тяжести и мантийные плюмы в южной части восточной Сибири (Россия) и в центральной Монголии // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45, № 10. – С. 1248–1258.
15. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
16. Goldie M. Self-potentials associated with the Yanacocha high-sulfidation gold deposit in Peru // Geophysics. – 2002. – Vol. 67, Issue 3. – P. 684–689. DOI: 10.1190/1.1484511
17. Столов Б. Л., Каштаев Б. И., Бардина Э. С. Перспективы и основные направления развития метода естественного электрического поля в Приморском и Хабаровском краях // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2013. – № 3 (16). – P. 21–29.

References

1. Semenov, A. S. (1974). *Elektrozvedka metodom yestestvennogo elektricheskogo polya*. 2nd edition, revised and expanded. Leningrad, Nedra Publ., 392 p. (In Russian).

2. Cveshnikov, G. B. (1967). Elektrokhimicheskiye protsessy na sul'fidnykh mestorozhdeniyakh. Leningrad, LGU Publ., 160 p. (In Russian).
3. Zhamaletdinov, A. A. (1996). Grafit v zemnoy kore i anomalii elektroprovodnosti. Fizi-ka Zemli, (4), pp. 12-29. (In Russian).
4. Zhamaletdinov, A. A. (2006). Elektroprovodnost' zemnoy kory territorii Rossii i sopre-del'nykh stran. Voprosy geofiziki, (39), pp. 69-90. (In Russian).
5. Vol'fson, F. I., Yakovlev, P. D. (1975). Struktury rudnykh poley i mestorozhdeniy. Mos-cow, Nedra Publ., 271 p. (In Russian).
6. Kopylov, M. I. (2010). Fiziko-geologicheskiye modeli formirovaniya rudonosnykh sis-tem yuga Dal'nego Vostoka Rossii. Diss. dokt. geol.-mineral. nauk. Irkutsk, 293 p. (In Russian).
7. Sazonov, V. N., Koroteev, V. A., Ogorodnikov, V. N., Polenov, Yu. A., & Velika-nov, A. Ya. (2011). Gold in "black shales" of the Urals. Lithosphere, (4), pp. 70-92. (In Russian).
8. Kerimov, R. B. (2010). Tipomorfnye osobennosti zolotorudnoy mineralizatsii v cherno-slantsevykh kompleksakh yuzhnogo sklona Bol'shogo Kavkaza i ee perspektivy (Azerbaydzhan). Samorodnoe zoloto: tipomorfizm mineral'nykh assotsiatsiy, usloviya obrazovaniya mestorozhde-niy, zadachi prikladnykh issledovaniy: materialy Vserossiyskoy konferentsii. Tom 1. Moscow, IGM Publ., pp. 237-240. (In Russian).
9. Nishida Y., Matsushima N., Goto A. (1996). Self-Potential Studies in Volcanic Areas(3): Miyake-jima, Esan and Usu. Journal of the Faculty of Science. Series 7, Geophysics, 10, Issue 1, pp. 63-77. (In English).
10. Aizawa, K. (2004). A large self-potential anomaly and its changes on the quiet Mt. Fuji, Japan. Geophysical Research Letters, 31. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1029/2004GL019462>.
11. Lementueva, R. A., Khromov, A. A., Irisova, E. L., & Borisova, L. E. (2009). Obschie zakonomernosti estestvennykh elektricheskikh poley i ikh svyaz' s geotektonicheskimi strukturami (Kamchatka). Tektonofizika i aktual'nye voprosy o Zemle. K 40-letiyu sozdaniya M. V. Gzovskim laboratorii tektonofiziki v IFZ RAN: materialy dokladov Vserossiyskoy konferentsii. V dvukh tomakh. Tom 2. Moscow, IFZ Publ., 451 p. (In Russian).
12. Os'kin, I. M. (1968). Rezul'taty geofizicheskikh poiskov margantseвого orudneniya v Pri-sayan'e. Trudy Irkutskogo politekhnicheskogo instituta. Ser. geofiz., 51, pp. 74-80. (In Russian).
13. Dmitriev, A. N. (2002). Geologo-geofizicheskie osnovy poiskov elektricheskikh polyarizo-vannykh ob'ektov - neftyanykh i rudnykh zalezhey (na primere Zapadnoy Sibiri): Diss. dokt. geol.-mineral. nauk. Tyumen, 280 p. (In Russian).
14. Zorin Yu. A., & Turutanov E. Kh. (2004). Regional isostatic gravity anomalies and man-tle plumes in southern East Siberia (Russia) and Central Mongolia. Russian Geology and Geo-physics, 45(10), pp. 1248-1258. (In English).
15. Zharkov, V. N. (1978). Vnutrennee stroenie Zemli i planet. Moscow, Nauka Publ., 192 p. (In Russian).
16. Goldie, M. (2002). Self-potentials associated with the Yanacocha high-sulfidation gold de-posit in Peru. Geophysics, 67(3), pp. 684-689. (In English). DOI: 10.1190/1.1484511
17. Stolov, B. L., Kashaev, B. I., & Bardina, E. S. (2013). Prospects and the main directions of development of the method of natural electric field in the Primorsky and Khabarovsk territories. Bulle-tin of the Engineering school of the far Eastern Federal University, (3(16)), pp. 21-29. (In Russian).

Сведения об авторе

Дмитриев Аркадий Николаевич, д. г.-м. н., профессор кафедры прикладной геофизики, директор научно-технического центра «Геофизические поисковые технологии», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: dmitriev38@inbox.ru

Information about the author

Arkadiy N. Dmitriev, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor at the Department of Applied Geophysics, Director of the Scientific and Technical Center "Geophysical Exploration Technology", Industrial University of Tyumen, e-mail: dmitriev38@inbox.ru