

**Роль термоэлектрических элементов земной коры в изучении  
ее глубинных температурных процессов**

**А. Н. Дмитриев**

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

*Аннотация.* Разработана модель природного термоэлектрического элемента земной коры. Его основой являются долгоживущие глубинные разломы с графитистыми породами внутри, которые обеспечивают непрерывную электрическую связь между верхней частью земной коры и мантией. Разность температур между ними из-за геотемпературного градиента может достигать 1 000 °С и более. В результате в геотермоэлектрическом элементе, на основе явления Зеебека, возникают термо э.д.с. и направленно движущиеся снизу — вверх термоэлектрические токи. По этой причине над графитистыми породами могут фиксироваться электрохимические потенциалы с наложенными на них термopotенциалами любой интенсивности вплоть до –2...–10 В. Стационарные наблюдения за этими термopotенциалами могут способствовать изучению напряженных зон Земли и контролировать температурную динамику глубинных процессов, которые часто связываются с вулканической деятельностью и сейсмическими событиями.

*Ключевые слова:* термоэлектрический элемент земной коры; геотемпературный градиент; термоэлектрический потенциал

**The role of thermoelectrical elements of Earth's crust in the study  
of its thermal deep processes**

**Arkadiy N. Dmitriev**

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

*Abstract.* The article is devoted to the study of thermoelectrical element. The model of thermoelectrical element of Earth's crust was developed. Long-lived deep faults with graphite ores inside are the basis of the element, they provide continuous electrical connection between the upper part of Earth's crust and the mantle. Temperature difference between them can reach 1 000 °C and more because of

geotemperature gradient. That is why Seebeck effect causes thermopower and thermoelectrical currents moving directly upwards to arise. And that is the reason why natural electric potentials of high intensity up to  $-2 \dots -10$  V are fixed over graphitized rocks because of presence of thermopower. There was found a mathematical solution to quantify them. Stationary observation of those thermopotentials can help study Earth's tense zones and control the dynamics of thermal deep processes, which are often connected with volcanic activity and seismic events.

*Key words:* thermoelectrical element of Earth's crust; geotemperature gradient; thermopotential

## Введение

Ученые различных континентов не менее 100 лет занимаются изучением природы естественного электрического поля, регистрируемого над металлическими электронными проводниками [1–4]. В настоящее время имеются некоторые конкретные достижения в области ее понимания, однако до сих пор остается неразработанной модель природы этого поля для углисто-графитистых пород (УГП), также являющихся природными электронными проводниками [2]. Последние, как известно, широко распространены на планете [5, 6], и с ними пространственно связываются многочисленные месторождения различных металлов преимущественно гидротермального типа [7–9]. Проведенное физическое моделирование с лабораторными электрохимическими ячейками, имитирующими природные электрохимические ячейки с графитовыми электродами, подтвердило не только возможность формирования сульфидных минералов электрохимическим путем в природных условиях, но и позволило понять причины колломорфности, полосчатости и зональности руд [10].

Основным препятствием в создании электрохимической модели является несопоставимость измеряемых в лабораторных условиях величин электродного потенциала графитовых образцов с интенсивностью аномалий естественного электрического потенциала, наблюдаемых в природных условиях над УГП. Так, например, по экспериментальным данным графит и его аналоги относятся к химически инертным материалам и при концентрациях растворов ниже 0,1 % характеризуются электродным потенциалом преимущественно не более 0,04 В, хотя при высоких концентрациях растворов (5, 1 и 0,1 %) и  $pH = 1,3-2$ , почти не встречающихся в природе, величина потенциала отмечалась близкой электродному потенциалу платины +0,7 В [2]. В экспериментах с образцами графита, помещенными внутрь различных пород, насыщенных 0,1 % раствором NaCl, при их постепенном промерзании до  $-6$  °С, наблюдались изменения величины потенциалов образцов в узком диапазоне  $-0,02 \dots +0,04$  В. Эти величины почти в 50 раз меньше измеряемых потенциалов в условиях многолетне-мерзлых пород Полярного Урала [11, 12].

В то же время в природных условиях над электропроводящими породами, залегающими в границах зон глубинных разломов, почти на всех континентах нашей планеты регистрируются интенсивные аномалии естественного электрического потенциала в широком диапазоне — от  $-1 \dots -3$  до  $-10$  В ( $-3$  В [13],  $-5$  В [14],  $-10$  В [15],  $-6 \dots -10,2$  В [16]). Эти величины невозможно объяснить с позиции электрохимических процессов, способных лишь при электролитическом разложении воды достичь теоретически максимальной величины в 1,23 В. Подтверждением этому являются протекающие в реальном времени в границах кальдеры Узон на Камчатке контрастные и мощные при-

родные окислительно-восстановительные процессы зоны окисления, потенциалы которых достигают лишь  $-200$  мВ [17]. В настоящее время вопрос о модели природы естественного электрического поля над сульфидными рудными телами почти решен. Установлено, что природа полей, наблюдаемых над ними (за исключением УГП), — геотермоэлектрохимическая [12, 18]. В то же время накопившиеся знания по экстремальным значениям естественных потенциалов над углисто-графитистыми толщами и графитизированными породами, которые тяготеют к зонам глубинных разломов и обладают непрерывной электрической проводимостью, приводят к мысли искать решение о природе этих полей с позиции не электрохимической, а более универсального природного физического процесса.

К настоящему времени эта проблема становится важной, так как все более подтверждается существующая связь динамики этих потенциалов с глубинными температурными процессами, периодически активизирующимися в местах взаимодействия земной коры и мантии [19].

В этой связи далее в статье на основе обобщения и анализа новых сведений по наблюдаемым естественным электрическим полям над УГП, включая наблюдения в районах вулканов и дополнительно выполненных лабораторных экспериментов, построена наиболее вероятная, с отсутствием явных и неявных противоречий, геотермоэлектрическая модель природы для УГП. В ее основе термоэлектрический элемент земной коры (глубинного разлома, заполненного графитистыми породами), к верхнему и нижнему концам которого приложена разность геотемператур. Последняя является причиной появления у термоэлектрического элемента термо э.д.с. и термоэлектрических токов, связанных с явлением Зеебека.

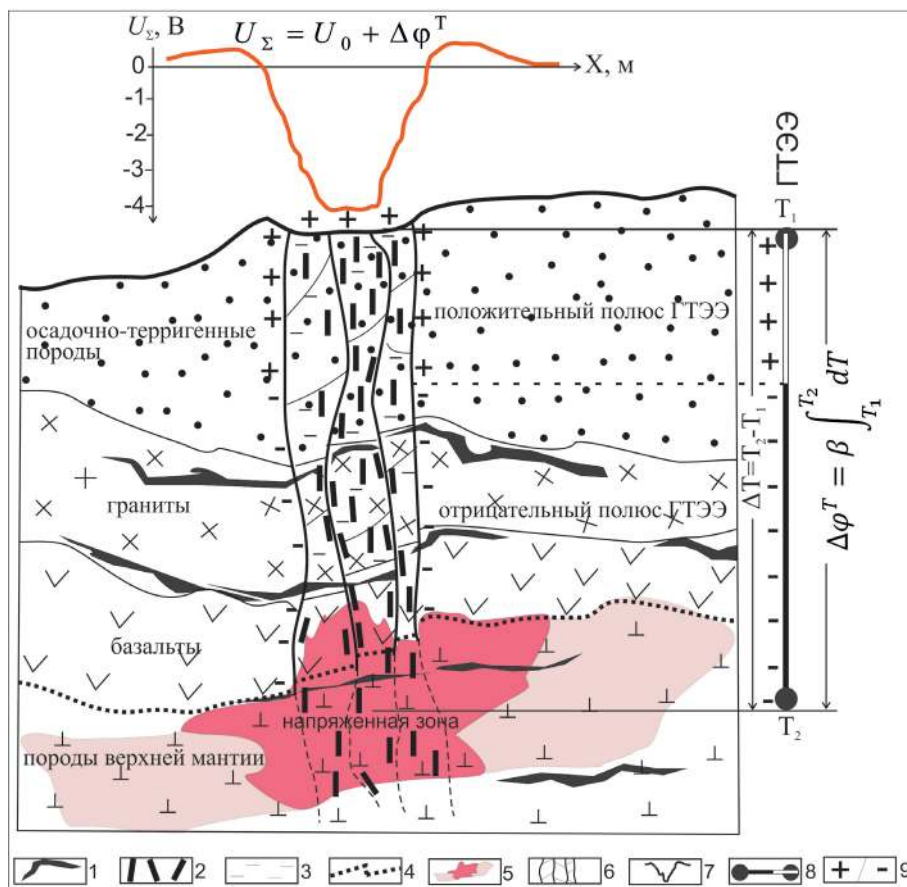
#### **Модель геотермоэлектрического элемента земной коры**

К настоящему времени известны многочисленные исследования углисто-графитистых пород на большие глубины, которые показали, что графит и графитистые породы широко распространены не только в земной коре, но и в мантии, где отмечается присутствие крупнейших пластовых зон высокой электропроводности, затрудняющих для электромагнитных методов дальнейшее изучение мантии на глубину [5, 6]. Кроме того, в последние десятилетия геологами и геофизиками активно изучаются глубинные разломы не только как тектонические структуры, играющие основную роль в формировании месторождений металлических руд, но и как главные элементы планеты, в границах которых происходят сейсмические события, причины зарождения которых находятся на больших глубинах.

Наряду с этим многочисленными исследователями электропроводности нашей планеты установлено, что глубинные и, в частности, коромантийные разломы континентальной коры трассируются линейно-прерывистыми по латерали вертикальными зонами высокой электропроводности, которым соответствуют широко развитые в границах разломов электропроводящие графитистые образования. Обобщенный разрез такого внутриразломного геотермоэлектрического элемента (ГТЭЭ), трассируемого на дневной поверхности линейными аномальными электрическими полями, приведен на рисунке.

Долговременность существования ГТЭЭ на большом отрезке геологического времени определяется периодически активизирующимися глубинными температурными процессами. Тектонические силы различной интенсивности и направления перемещают внутренние блоки пород разлома по многочисленным плоскостям скольжения, вдоль которых постепенно формируется непре-

рывная электрическая связь. Это объясняется, как правило, появлением вдоль плоскостей скольжения электропроводящих минералов: графита, шунгита, угля, графена, которые в зависимости от критических  $P$ ,  $T$  трансформируются из карбонатных пород.



**Рисунок. Обобщенный геотермоэлектрический элемент глубинного коромантийного разлома континентальной коры:** 1 — графитовые залежи; 2 — углисто-графитистые породы внутри ГТЭЭ; 3 — водные растворы; 4 — граница Мохо; 5 — зона активного развития глубинного температурного процесса; 6 — блоки пород, поверхности скольжения, тектонические разрывные нарушения; 7 — график естественного электрического потенциала  $U_{\Sigma}$ , зафиксированного над ГТЭЭ; 8 — условное графическое обозначение ГТЭЭ; 9 — знаки зарядов полюсов ГТЭЭ

С другой стороны, если ГТЭЭ является электронным проводником и к его концам приложена разность температур  $\Delta T$ , то исходя из теории термоэлектричества, между этими концами неизбежно возникает разность потенциалов  $\Delta \phi$ . Последняя связывается с направленным движением диффузионного потока возбужденных (нагретых) электронов от горячего конца к холодному и вычисляется по формуле [20, 21]

$$\Delta \phi = \Delta U^T = \int_{T_1}^{T_2} \beta dT, \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент термо э.д.с., для чистых металлов составляет  $0,0001 \text{ В}\cdot\text{град}^{-1}$ , а для ряда полупроводников —  $0,0015 \text{ В}\cdot\text{град}^{-1}$  [21].

Зная  $\Delta U^T$ , определим напряженность электрического поля  $E_T$ , приложенную к ГТЭЭ, из отношения

$$E_T = \Delta U^T / H, \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}, \quad (2)$$

где  $H$  — вертикальная длина ГТЭЭ, м.

Приняв разность потенциалов  $\Delta U^T$  равной  $10,2 \text{ В}$ , что соответствует на данный момент зарегистрированной на планете максимальной величине согласно [16], и  $H$ , равную толщине земной коры, например,  $30\,000 \text{ м}$ , получим напряженность поля  $E_T$  порядка  $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ . Под воздействием последнего электроны в ГТЭЭ приобретают уже направленное движение от его нагретой нижней части к холодной верхней части, но это движение имеет место только при существовании динамических процессов нижней температуры (ее постепенного возрастания или убывания).

Опираясь на квантовую теорию электропроводности электронных проводников и полупроводников, выполним расчеты среднего пути пробега электронов и скорости дрейфа электронов [22–24].

• Средний путь пробега электронов, смещаемых в направлении действия поля  $E_T$  имеет вид

$$l = \frac{\sigma \hbar (3\pi^2)^{1/3}}{e^2 n^{2/3}}, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  — электропроводность графитистых пород, графита,  $\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$ ;  $\hbar$  — постоянная Планка,  $1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ ;  $e$  — эффективный заряд электрона, Кл ( $1,6 \cdot 10^{-19}$ );  $n$  — концентрация (количество) электронов в ед. объема электронного проводника (графита), вычисляется для реальных условий состояния свободного электронного газа при давлении  $p$ , близком уровню подошвы земной коры по формуле [25]

$$n = (5 \frac{m_e}{\hbar^2} (3\pi^2)^{-2/3})^{3/5} p^{3/5}. \quad (4)$$

Подставляя в (4) известные величины: массу электрона  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  и давление  $p = 1,3 \cdot 10^4 \text{ атм}$  ( $1,32 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ), получаем концентрацию электронов порядка  $n = 1,79 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

Тогда средний путь пробега электронов при подстановке в (3) средней величины  $n$  и известной средней электропроводности  $\sigma$  монокристалла графита при протекании тока вдоль его базисной плоскости  $2,5 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$  ( $0,3\text{--}0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) [26] составляет  $l = 4,24 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ . Как видно, путь пробега электронов крайне мал из-за столкновений с кристаллической решеткой и напрямую зависит от величины напряженности поля  $E_T$ .

• Скорость дрейфа электронов в направлении действия электрического поля  $E_T$  имеет вид

$$v_d = \frac{e E_T l}{2 m v}, \quad (5)$$

где  $v$  — средняя скорость теплового движения электронов. Для ее вычисления используем формулу

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}, \quad (6)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>;  $T$  — температура, К (принимается равной 1 273,15 К (или 1 000 °С) для нижней части ГТЭЭ).

Подставив приведенные значения в (6), получим  $v = 2,22 \cdot 10^5$  м·с<sup>-1</sup>. Как видно, хаотичное перемещение нагретых электронов происходит с очень высокой скоростью.

Подставив  $l$  и  $v$  в выражение (5), получим среднюю скорость пробега (дрейфа) электронов  $v_d$  внутри ГТЭЭ, равную  $5,72 \cdot 10^{-13}$  м·с<sup>-1</sup>.

Однако малая скорость дрейфа электронов не противоречит фактическим данным — постоянный ток во всей электрической цепи, независимо от ее длины, устанавливается почти мгновенно, если к концам этой цепи подключается источник тока неэлектрического происхождения [27]. В нашем случае таким источником является приложенная к ГТЭЭ разность геотемператур, а в качестве электрической цепи выступает непосредственно «тело» ГТЭЭ. Вдоль цепи электрическое поле распространяется со скоростью, близкой к скорости света  $c = 3 \cdot 10^8$  м·с<sup>-1</sup>. С этого момента фиксируется упорядоченное, хотя и крайне медленное движение электронов со скоростью  $v_d$  [22]. В результате можно заключить, что динамика естественного электрического потенциала  $\Delta U^T$ , регистрируемая над ГТЭЭ, будет находиться практически в фазе с динамикой поля  $E_T$ , а, следовательно, и с протекающей в реальном времени температурной динамикой глубинных процессов (отставание по фазе не превышает  $\tau = l/c = 10^{-4}$  с).

Следовательно, графитистые образования в зонах глубинных разломов можно рассматривать как природные термоэлектрические элементы Земли. Последние по ряду геолого-геофизических предпосылок имеют все основания существовать и быть прямыми индикаторами температуры внутренних земных оболочек. Для этого над ГТЭЭ необходимы мониторинговые измерения значений естественного электрического потенциала  $U_{\Sigma}$ , который всегда представляет собой сумму собственного электродного потенциала проводника  $U_0$  и наложенного термopotенциала  $\Delta U^T$ . В то же время температура этих оболочек, как известно, до сих пор оценивается косвенными способами [28–30].

Теперь важно, поскольку в ГТЭЭ имеет место долговременное движение потоков электронов, которые, по существу, являются термоэлектрическими токами, найти величину этих токов  $I$  и их плотность  $J$ .

В формуле (1) интегральное выражение справа в неявном виде представляет собой, согласно закону Ома, произведение постоянного тока  $I$  на омическое сопротивление проводящих пород ГТЭЭ  $R$ , то есть  $\Delta\varphi = \beta\Delta T = IR$ . Отсюда находим величину постоянного тока  $I$  в случае соблюдения условия, что  $\Delta T$  имеет мгновенные значения, то есть находится в динамическом режиме

$$I = \frac{\beta\Delta T S}{\rho H} = \frac{\sigma\beta\Delta T S}{H}, \quad (7)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление пород ГТЭЭ, Ом·м;  $\sigma$  — его электропроводность, См·м<sup>-1</sup>;  $S$  — величина поверхности ГТЭЭ (его сечение), м<sup>2</sup>;  $H$  — высота ГТЭЭ (его длина), м.

Из выражения (7), если переместить  $S$  в левую часть равенства, найдем плотность тока  $J$ :

$$J = \frac{\sigma \beta \Delta T}{H}, \text{ А/м}^2. \quad (8)$$

Расчеты показывают, что при приложенной к концам ГТЭЭ разности температур  $\Delta T = 1\ 000\ ^\circ\text{C}$ , электропроводности графитистых пород  $\sigma = 2,5\ \text{См}\cdot\text{м}^{-1}$  и высоте ГТЭЭ  $H = 30\ 000\ \text{м}$  плотность тока  $J$  на единицу площади термоэлектрического элемента составляет  $8,3 \cdot 10^{-6}\ \text{А}\cdot\text{м}^2$ . В то же время величина тока, проходящего через поверхность ГТЭЭ, например, размером  $50 \times 4\ 000\ \text{м}^2$ , не превышает  $1,67\ \text{А}$ . Этот электрический ток в виде потока электронов небольшой плотности, двигаясь в вертикальном направлении вдоль ГТЭЭ, не способен к диссипации во вмещающих породах, которые представляют собой в основном диэлектрики с высоким сопротивлением  $10^4\text{--}10^8\ \text{Ом}\cdot\text{м}$  [31, 32].

Убедительным доказательством влияния динамики глубинной температуры на величину естественного электрического потенциала являются его систематические измерения над различными объектами на территории вулканов и fumarольных выходов Японии, Италии, Камчатки и др. [14, 33–37].

Кроме того, в подтверждение влияния температуры на амплитуду естественного потенциала проведены лабораторные исследования с электронными проводниками при изменяющихся температурах их верхней и нижней частей [38]. Эксперимент выполнен для наклонной медной пластины, размещенной в двух электролитических ваннах, что исключало влияние конвективного тепла электролита. Из измерений естественного потенциала установлено, что коэффициент термо э.д.с. составил  $0,0075\ \text{мВ}\cdot\text{град}^{-1}$ , несмотря на то что верхняя кромка пластины находилась на глубине  $1\ \text{см}$ .

### **Выводы**

Показано, что глубинные разломы, в границах которых преобладают графитистые породы, могут представлять собой термоэлектрические элементы земной коры (ГТЭЭ), которым свойственно присутствие термо э.д.с. и термоэлектрических токов.

Разработана математическая модель ГТЭЭ, которая позволяет находить количественную связь между термоэлектрическими характеристиками ГТЭЭ и приложенной к нему разностью температур.

Мониторинговые наблюдения естественного электрического потенциала над термоэлектрическими элементами земной коры могут стать для науки непосредственным инструментом изучения как динамики глубинных температурных процессов в этой земной коре, так и ее областей, связанных с различного рода источниками напряжений экзогенного и эндогенного характера.

### **Библиографический список**

1. Sato M., Mooney H. M. The electrochemical mechanism of sulphide self-potentials // *Geophysics*. – 1960. – Vol. 25, Issue 1. – P. 226–249. DOI: 10.1190/1.1438689
2. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л.: Недра, 1980. – 446 с.
3. Sivenas P., Beales F. W. Natural geobatteries associated with sulphide ore deposits, I. Theoretical studies // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1982. – Vol. 17, Issue 2. – P. 123–143. DOI: 10.1016/0375-6742(82)90029-2

4. Bigalke J., Grabner E. W. The Geobattery model: a contribution to large scale electrochemistry // *Electrochimica Acta*. – 1997. – Vol. 42, Issues 23–24. – P. 3443–3452. DOI: 10.1016/S0013-4686(97)00053-4
5. Жамалетдинов А. А. Электропроводность земной коры территории России и сопредельных стран // *Вопросы геофизики*. – 2006. – Вып. 39. – С. 69–90.
6. Жамалетдинов А. А., Кулик С. Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // *Геофизический журнал*. – 2012. – Т. 34, № 4. – С. 22–397.
7. Вольфсон Ф. И., Яковлев П. Д. Структуры рудных полей и месторождений. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
8. Копылов М. И. Физико-геологические модели формирования рудоносных систем юга Дальнего Востока России: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Иркутск, 2010. – 295 с.
9. Экспериментальное исследование процессов концентрирования меди, цинка, кобальта, никеля и серебра в черных сланцах дуруджинской зоны южного склона большого Кавказа (Азербайджан) / Ч. М. Кашкай [и др.] // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2017. – № 2. – С. 88–93.
10. Дмитриев А. Н. Об электрохимических явлениях в процессе минералообразования // *Советская геология*. – 1981. – № 6. – С. 106–113.
11. Дмитриев А. Н., Боркун Ф. Я. Экспериментальные исследования естественных ЭДС электронных проводников в мерзлых породах // *Труды ЗапСибНИГНИ*. – Вып. 74. – 1974. – С. 174–178.
12. Дмитриев А. Н. Геолого-геофизические основы поисков электрически поляризованных объектов — нефтяных и рудных залежей (на примере Западной Сибири). – Тюмень, 2007. – 226 с.
13. Lasfargues P. Prospection électrique par courants continus: Carte de potentiel, resistivité, polarisation induite. – Paris: Masson et Cie, 1957. – 290 p.
14. Aizawa K. A large self-potential anomaly and its changes on the quiet Mt. Fuji, Japan // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – Vol. 31, L05612. – Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2004GL019462>.
15. Столов Б. Л. Об уникальных аномалиях геоэлектрических полей Приморья и их значении для геологического изучения недр (Дальний Восток России) // *Тихоокеанская геология*. – 2018. Т. 37, № 1. – С. 67–76. DOI: 10.30911/0207-4028-2018-37-1-67-76
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. Карпов Г. А., Федорченко И. А., Яроцкий Г. П. Результаты комплексных геофизических исследований в кальдере Узон (Камчатка) // *Материалы конф., посвященной Дню вулканолога (30–31 марта 2009 г.)*. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. – С. 141–148.
18. Дмитриев А. Н. Постоянное естественное электрическое поле Земли – его природа, новые поисковые возможности // *Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования / Под ред. В. А. Малинникова, В. В. Вишневого*. – М.: Академия наук о Земле, 2009. – Т. 2. – С. 56–64.
19. Столов Б. Л., Дмитриев В. И. Глубинные аномалии естественного электрического поля в Приморье, геологическая природа и методика их выделения // *Геофизика*. – 2006. – № 4. – С. 44–51.
20. Калашников С. Г. Электричество. – М.: Наука, 1977. – 592 с.
21. Савельев И. В. Курс общей физики: в 3 т. Т. 2. – М.: Наука, 1970. – 336 с.
22. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. – М.: Высшая школа, 1980. – 464 с.
23. Тюшев А. Н. Курс лекций по физике. Часть 5. Квантовая физика: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск, СГГА, 2011. – 167 с.
24. Павлов П. В., Хохлов А. Ф. Физика твердого тела: учеб. – М.: Высшая школа, 2000. – 494 с.
25. Мартинсон Л. К., Смирнов Е. В. Квантовая физика. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 496 с.
26. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.
27. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1996, 638 с.
28. Tozer D. C. The electrical properties of the Earth's interior // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 1959. – Volume 3. – P. 414–435. DOI: 10.1016/0079-1946(59)90010-2



29. Uffen R. J. A method of estimating the melting point gradient in the Earth's mantle // Transactions American Geophysical Union banner. – 1952. – Vol. 33, Issue 6 – P. 893–896. DOI: 10.1029/TR033i006p00893
30. Общая геофизика: учеб. пособие / Под ред. В. А. Магницкого. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 317 с.
31. Хмелевской В. К. Геофизические исследования земной коры. Книга 2. Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. – Дубна, 1999. – 182 с.
32. Хамидуллина Г. С. Петрофизика: учеб. пособие. – Казань: Казанский государственный университет, 2009. – 90 с.
33. Structural control of collapse events inferred by self-potential mapping on the Piton de la Fournaise volcano (La Reunion Island) / S. Barde-Cabusson [et al.] // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – Vol. 209–210. – P. 9–18. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2011.09.014
34. Self-Potential Studies in Volcanic Areas (3) – Miyake-jima, Esan and Usu / Ya Nishida [et al.] // Journal of the Faculty of Science. Series 7: Geophysics. – 1996. – Vol. 10, Issue 1. – P. 63–77.
35. Self-potential anomalies in some Italian volcanic areas / R. D. Maio [et al.] // Annali di Geofisica. – 1996. – Vol. XXXIX, Issue 1. – P. 179–188.
36. Self-Potential Studies in Volcanic Areas(2): Usu, Hokkaido Koma Ga-take and Me-akan / N. Matsushima [et al.] // Journal of the Faculty of Science. Series 7: Geophysics. – 1990. – Vol. 8, Issue 5. – P. 465–477.
37. 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: сб. докладов Всеросс. конф. В 2 т. – М.: ИФЗ, 2009. – Т. 2. – 451 с.
38. Дмитриев А. Н. Экспериментальная проверка природы естественного электрического поля Земли // Современные технологии нефтегазовой геофизики: материалы докладов междунар. науч.-практ. конф. (Тюмень, 18–19 мая 2017 г.) / Отв. ред. С. К. Туренко. – Тюмень: ТИУ, 2017. – С. 5–12.

#### **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 Geophysical Exploration Technology Scientific and Technical Center, Industrial University of Tyumen, e-mail: dmitriev38@inbox.ru