



## ОБЗОР ОБОСНОВАНИЙ К ВВЕДЕНИЮ ТЕРМИНА «ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»

**В.В. АКСЕНОВ**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики  
Сибирского отделения Российской академии наук  
6, Морской проспект, Новосибирск 630090, Россия*

### **АННОТАЦИЯ**

**Введение.** В статье приводятся аргументы к введению термина «геофизическая электродинамика».

**Цель.** Обосновать введение нового термина «геофизическая электродинамика».

**Методы обоснования.** Изучаются пределы применимости уравнений Максвелла, кроме того, вводятся понятия: о новой парадигме в электродинамике, о новых уравнениях в геофизической электродинамике, об отличиях новой электродинамики от электродинамики Максвелла, об источниках тороидальных и полоидальных электромагнитных полей, о тороидальных токах в уравнениях Максвелла, о несиловых электромагнитных полях, о квантовом эффекте в несиловых электромагнитных полях, тороидальные поля в ядре Земли, математические достижения в новой парадигме, о воспроизведении источников электромагнитного поля Земли, эффекты в классической электродинамике, объясненные в геофизической электродинамике.

**Результаты.** Получены ответы на выше поставленные обоснования.

**Заключение.** Физическое и математическое обоснования введения термина «геофизическая электродинамика» имеют подтверждение как в естественном электромагнитном поле Земли, так и в ряде давно известных классических эффектов в стандартной электродинамике Максвелла. Небольшие, но принципиальные отличия одной электродинамики от другой позволят уменьшить число не объяснимых с точки зрения уравнений Максвелла эффектов, встречающихся как в теории, так и в экспериментах на Земле.

**Ключевые слова:** электродинамика, геофизическая электродинамика, обоснования к введению нового термина

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**Для цитирования:** Аксенов В.В. Обзор обоснований к введению термина «Геофизическая электродинамика». *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2022;64(2):24—30. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-24-30>

*Статья поступила в редакцию 21.01.2022*

*Принята к публикации 05.09.2022*

*Опубликована 15.09.2022*

# REVIEW OF RATIONALES FOR THE INTRODUCTION OF THE “GEOPHYSICAL ELECTRODYNAMICS” TERM

VALENTIN V. AKSENOV

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS  
6, Morskoy ave., Novosibirsk 630090, Russia*

## ABSTRACT

**Background.** The article provides arguments for the introduction of the “geophysical electro-dynamics” term.

**Aim.** To justify the introduction of a new term “geophysical electro-dynamics”.

**Methods of substantiation.** The limits of the applicability of Maxwell’s equations are studied. Additionally, some concepts are introduced, in particular, about a new paradigm in electro-dynamics, about new equations in geophysical electro-dynamics, about the differences between new electro-dynamics and Maxwell’s electro-dynamics, about the sources of toroidal and poloidal electro-magnetic fields, about toroidal currents in Maxwell’s equations, about non-power electromagnetic fields, about the quantum effect in non-power electromagnetic fields, toroidal fields in the core of the Earth, mathematical achievements in the new paradigm, about the reproduction of sources of the electromagnetic field of the Earth, and effects in classical electro-dynamics explained by geophysical electro-dynamics.

**Results.** Responses to the above justifications were received.

**Conclusion.** Physical and mathematical justifications for the introduction of the term “geophysical electro-dynamics” find confirmation both in the natural electromagnetic field of the Earth, and in a number of long-known classical effects in the standard Maxwell’s electro-dynamics. Small but fundamental differences of one electro-dynamics from another will reduce the number of effects unexplained from the standpoint of Maxwell’s equations, encountered in both theory and experiments on Earth.

**Keywords:** electro-dynamics, geophysical electro-dynamics, justification for the introduction of a new term

**Conflict of interest:** the author declares that there is no conflict of interest.

**Financial disclosure:** no financial support was provided for this study.

**For citation:** Aksenov V.V. Review of rationales for the introduction of the “Geophysical electro-dynamics” term. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 2022;64(2):24—30. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-2-24-30>

*Manuscript received 21 January 2022*

*Accepted 5 September 2022*

*Published 15 September 2022*

Впервые термин «геофизическая электродинамика» возник в среде физиков, которые занимались исследованием магнитосферы с использованием вслед за Ю. Паркером [15] эффекта Лармора [10]. Этот эффект существенно изменил уравнение индукции Максвелла за счет введения в уравнение индукции (в электрическое поле) дополнительного слагаемого, содержащего скорость движения одной координатной системы относительно другой [15]. Из-за этого возникла некоторая другая электродинамика, блестяще воспроизведенная в космической электродинамике Ю. Паркера [15]. В своей книге Ю. Паркер напрямую высказался об электродинамике Максвелла: «...уравнения Максвелла

применяются в космосе, хотя их применимость не доказана...» [15]. Поэтому введение нового термина в электродинамику, а именно термина «геофизическая электродинамика», должно восходить к более глубокому пониманию роли уравнений Максвелла в описании наблюдаемых на Земле естественных электромагнитных полей, а также космических магнитных полей.

## О пределах применимости уравнений Максвелла

В связи с этим возникает проблема доказательства пределов применимости уравнений Максвелла в первую очередь к электромагнитным полям, наблюдаемым на Земле. Эту

проблему решает авторская теорема под названием «О пределах применимости уравнений Максвелла» [3]. В этой теореме дан ответ в том смысле, что уравнения Максвелла абсолютно верны в технической физике и любых экспериментах с электромагнитными полями на Земле.

Однако в естественном электромагнитном поле, обладающем хотя и относительно небольшими величинами магнитного числа Рейнольдса  $Rm_e \approx 10^3 \div 10^5$  ед., тем не менее в его напряженности начинает играть роль эффект Лармора, поэтому учет его требует введения в электродинамику тороидальных и полоидальных электромагнитных полей [12, 15].

#### О новой парадигме в электродинамике

Вместе с этим возникает необходимость замены парадигмы бездивергентных токов, имеющих место в основании уравнений Максвелла, на парадигму бездивергентных магнитных полей. Эта новая парадигма должна быть положена в основу корректировки уравнений Максвелла с целью учесть возможную дивергентность естественных электрических токов, создающих главное геомагнитное поле и поля его вариаций. Введение новой парадигмы изначально отрицает статическую парадигму в главном геомагнитном поле, введенную в позапрошлом веке К.Ф. Гауссом, и, естественно, требует разработки нового математического описания морфологии и напряженности главного геомагнитного поля, способов его генерации и в большей мере нового математического описания напряженности полей вариаций (переменного во времени магнитного поля) [3, 14]. Новая парадигма, восходящая к бездивергентности магнитного поля в связи с отсутствием магнитных зарядов, приводит к ортогональному тороидальному разложению векторного потенциала [4]. Следующим шагом является введение тороидальных и полоидальных электромагнитных полей вне источника [12].

#### О новых уравнениях геофизической электродинамики

Формулировка новых уравнений для естественного электромагнитного поля восходит к натурным экспериментам с естественными электромагнитными полями в атмосфере Земли [5, 8, 9] и носит во многом эмпирический характер, но под полным контролем уравнений Максвелла [1, 4]. Тем не менее новые уравнения хотя и объясняют наблюдаемые в атмосфере эффекты, но в основе своей значительно больше отвечают поведению

естественных электромагнитных полей на Земле. С другой же стороны, имеют явные отличительные черты от электродинамики Максвелла. Это обстоятельство как раз и дает основания называть порождаемую новыми уравнениями электродинамику геофизической электродинамикой. Эта новая электродинамика объясняет поведение естественных электромагнитных полей на Земле, в том числе и эффекты, зафиксированные в [5, 7, 8, 9] и др., не отвечающие классическим уравнениям Максвелла. По сравнению с уравнениями Максвелла, имеющими вид:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t, \quad \partial \mathbf{B} / \partial t = -\nabla \times \mathbf{E}, \\ \nabla \cdot (\mathbf{B}, \mathbf{H}, \mathbf{E}) = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

новые уравнения записываются по-иному [2]:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H}_p = \mathbf{j}_T + \mathbf{j}_T^{CT}, \quad \nabla \times \mathbf{H}_T = \mathbf{H}_p, \quad \nabla \times \mathbf{E}_p = 0, \\ \partial \mathbf{B}_p / \partial t = -\nabla \times \mathbf{E}', \quad \mathbf{E}' = \mathbf{E}_T + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}_p], \\ \nabla \cdot (\mathbf{H}, \mathbf{H}_T, \mathbf{H}_p) = 0, \quad \nabla \cdot (\mathbf{H}_T, \mathbf{B}_T, \mathbf{E}_T, \mathbf{D}_T) = 0, \\ \nabla \cdot \mathbf{E}' = \nabla \cdot [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{H}_p, \mathbf{E}_p$  — полоидальное магнитное и электрическое поля,  $\mathbf{H}_T, \mathbf{E}_T, \mathbf{j}_T, \mathbf{j}_T^{CT}$  — тороидальные поля и токи,  $\mathbf{V}$  — скорость одной координатной системы относительно другой,  $\mathbf{j}_T = \chi \mathbf{H}_T$ ,  $\chi = (i\omega\mu\sigma)^{1/2}$ .

#### Об отличиях новой электродинамики от электродинамики Максвелла

Система уравнений (2) имеет явные отличия от (1) тем, что ротор тороидального магнитного поля равен не электрическому току, как в (1), а полоидальному полю. Полоидальное электрическое поле потенциально. Индукция полоидального магнитного поля учитывает эффект Лармора. Тороидальные токи двумерны. Кроме того, новой геофизической электродинамике присущи следующие черты. Геофизическая электродинамика позволила ответить на главный вопрос, откуда по существу возник интерес к другой электродинамике. Он возник из-за стремления подтвердить *законность* появления эффектов Van Vleuten, Беньковой, Четаева и понять, почему возникает в непроводящей атмосфере с отсутствующими в ней электрическими токами непотенциальная часть магнитного поля вариаций естественного магнитного поля Земли. Для исследования этих фактов нужно было, кроме прочего, изменить парадигму в геомагнетизме. Перейти от статической парадигмы К.Ф. Гаусса к квазистационарной, основанной на уравнениях (2), где дивергенция магнитного поля равна нулю всюду, а вектор-потенциал, автоматически

следующий из основного уравнения  $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ , может быть тороидально и ортогонально разложен на составляющие  $\mathbf{A} = (Qr) + \nabla \times (Qr)$ , из которых затем следует определение тороидальных и полоидальных электромагнитных полей в атмосфере (за пределами источников главного геомагнитного поля и его вариаций) [4]. Этот результат объясняет появление непотенциального магнитного поля в бестоковой области, поэтому расширяет действие первого уравнения Максвелла за счет  $\nabla \times \mathbf{H}_T = \mathbf{H}_p$ . Он присущ только геофизической электродинамике.

#### Об источниках тороидального и полоидального электромагнитных полей

Поскольку на Земле турбулентности в магнитном поле из-за  $Rm_e \approx 10^3 \div 10^5$  ожидать не приходится (у Ю. Паркера турбулентность возникает при  $Rm_e \approx 10^{12} \div 10^{17}$  ед.), то напрямую встает вопрос об источниках тороидального и полоидального магнитных полей в геофизической электродинамике.

При этом возникают варианты постоянного магнитного поля и переменного электромагнитного поля от полных сферических постоянных и переменных электрических токов. Сферичность токов обязательна, так как теоремы Т. Каулинга [13] запрещают планальным и цилиндрическим электрическим токам возбуждать тороидальные магнитные поля из-за эффекта обратной симметрии [13]. Поэтому проекция полного сферического электрического тока на сферическую поверхность в сферических координатах имеет слагаемые, содержащие тороидальные электрические токи, которые генерируют тороидальное магнитное поле. Проекция полного переменного электрического тока в сферических координатах содержит как постоянную часть электрического тока, генерирующего постоянное тороидальное магнитное поле, так и напрямую две компоненты переменного тороидального электрического тока.

Согласно [3] в проекциях переменного полного сферического электрического тока на оси сферической системы координат имеются слагаемые:

$$\begin{aligned} \dots \mathfrak{a}^2 A_\theta &= \mathfrak{a}^2 \cdot 1/\sin \theta \cdot \partial Q / \partial \theta = \mathfrak{a}^2 H_{T\theta} = j_{T\theta}, \\ \dots \mathfrak{a}^2 A_\phi &= -\mathfrak{a}^2 \cdot \partial Q / \partial \theta = -\mathfrak{a}^2 H_{T\phi} = j_{T\phi}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathfrak{a}^2 = i\omega\mu\sigma$ , а  $j_{T\theta}$ ,  $j_{T\phi}$  — компоненты тороидального электрического тока, в которых магнитные поля  $H_{T\theta}$ ,  $H_{T\phi}$  направлены вдоль соответствующих компонент тороидального тока (совпадают по направлению). Это как раз подтверждает, что  $H_{T\theta}$ ,  $H_{T\phi}$  есть

компоненты, обладающие нулевой силой Лоренца (несиловые компоненты, для которых  $\nabla \times \mathbf{H}_T = \mathbf{H}_p$ ). Они как раз и наблюдаются в эксперименте в атмосфере, являясь в ней непотенциальными. В радиальной проекции, согласно авторской теореме [2], радиальная часть переменного поля компенсируется потенциальной частью, поэтому тороидальный ток остается двухкомпонентным.

#### О тороидальных токах в уравнении Максвелла

Что касается тороидальных токов в уравнениях Максвелла, то в [3] доказано выпадение этих токов при суммировании магнитных полей магнитного и электрического типов в наблюдаемые суммарные магнитные поля. Поэтому из-за выпадения в связи с требованием бездивергентности электрических токов в уравнениях Максвелла тороидальные магнитные поля были пропущены в максвелловской электродинамике.

В новой парадигме эффекта выпадения тороидального тока нет [3], поэтому наблюдаемые поля содержат тороидальные магнитные поля как в теории, так и в эксперименте и обнаруживаются в эксперименте за счет присутствия непотенциального магнитного поля в бестоковой области за счет  $\nabla \times \mathbf{H}_T = \mathbf{H}_p$ .

#### О несиловых электромагнитных полях

Самым, пожалуй, ярким свойством тороидальных магнитных полей на Земле является их несиловой характер в связи с отсутствием силы Лоренца в этом поле [4]. Несиловые электромагнитные поля имеют место как в главном геомагнитном поле Земли, так и в его переменной части — вариациях. В атмосфере Земли несиловые тороидальные магнитные поля проявляют себя в экспериментах, составляя почти половину магнитного поля спокойных солнечно-суточных вариаций, и обнаруживаются при подсчете интеграла по замкнутому контуру, расположенному в атмосфере (эффект Van Vleuten — Беньковой). Несиловое электрическое поле также измеряется непосредственно в атмосфере. Это большая по напряженности вертикальная составляющая электрического поля короткопериодических вариаций, названная в эксперименте Д.Н. Четаева  $E_z$ . Этой компоненты, согласно стандартным уравнениям Максвелла, в атмосфере быть не должно ( $\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}$  при  $\sigma = \text{const}$ ,  $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ ,  $E_z = 0$ ). В уравнении (2)  $E_z$  — не что иное, как  $E_p$ -полоидальное электрическое поле, потенциальное всюду, но имеющее большую напряженность, являясь электрическим полем второй моды электромагнитного поля КПК.

### Квантовый эффект в несиловых полях

Несилловые магнитные поля проявляют себя не только в наблюдаемых естественных электромагнитных полях, но еще и в ряде известных эффектов. Наиболее известен из них квантовый эффект Ааронова — Бома, в котором квантовую частицу при полете поперек отклоняет от траектории несиловое магнитное поле бесконечного цилиндрического соленоида с электрическим током, магнитное поле которого, согласно уравнениям (1), сосредоточено все внутри соленоида. В работе [4] доказан факт влияния несилового тороидального магнитного поля такого соленоида на квантовую частицу, при этом теорема Стокса остается справедливой и в случае эффекта Ааронова — Бома.

### Тороидальные поля в ядре Земли

Несомненный интерес вызывает доказательство наличия тороидального магнитного поля в ядре Земли. Авторы теории динамо-возбуждения главного геомагнитного поля на Земле предполагают наличие тороидального магнитного поля в ядре Земли на уровне 500 и более Гс. При этом словесно доказывают, что такое огромное по напряженности магнитное поле «заперто» в ядре и на поверхность Земли не выходит. Это утверждение признано авторами динамо на Земле повсеместно (и у нас, и за рубежом). В новой авторской парадигме удастся выделить тороидальное магнитное поле из данных эксперимента по МГГ 1957/1958 гг. Оказалось, что напряженность поля в ядре не более 3—4 Гс, чего явно недостаточно для взаимной генерации главного геомагнитного поля с помощью динамо-возбуждения [3]. Тем не менее тороидальное несиловое поле магнитное поле присутствует в наблюдаемом главном геомагнитном поле Земли. Это является доказательством отсутствия экрана для тороидального поля на всей поверхности Земли и в ее недрах. Без наличия такого экрана запереть тороидальное поле внутри Земли нечем, что полностью отрицает существование сильного тороидального поля в ядре Земли. Это отрицает также наличие самовозбуждения главного геомагнитного поля внутри Земли.

### Математические достижения новой парадигмы

Кроме физических обоснований новой парадигмы в геофизической электродинамике имеет место ряд математических вопросов, а именно вопрос о дивергенции тороидального разложения векторного потенциала. В [2] доказана теорема о калибровках Кулона и Лоренца для такого

потенциала. В этой теореме доказан факт совпадения определений дивергенции с калибровками Кулона и Лоренца в тороидальном разложении векторного потенциала с классическим определением их в максвелловской электродинамике.

Второй вопрос касается введения вместо одного скалярного потенциала для определения тороидальных и полоидальных электромагнитных полей, как это допущено в новой парадигме автора, двух скалярных потенциалов, как это имеет место в монографии Г. Моффата [12]. Автором показана нелепость введения двух скалярных потенциалов, которая возникает при доказательстве взаимной генерации тороидальных и полоидальных магнитных полей. Один из потенциалов участвует в определении полоидального магнитного поля, будучи в определении только тороидального магнитного поля. Это противоречие снимается с помощью тороидального ортогонального разложения векторного потенциала с одним скалярным потенциалом.

### О воспроизведении источников электромагнитных полей

В статической парадигме К.Ф. Гаусса источники эквивалентны реальным из-за отсутствия электрических токов в начальных определениях магнитных полей. Статическая математика К.Ф. Гаусса восходит при воспроизведении источников к эквивалентности двойных слоев зарядов силе замкнутых токов. При применении формул, полученных таким путем, к реальным данным возникают дивергентные области, куда втекают или вытекают электрические токи. В ионосфере такая модель не реализуется. Это подтверждают реальные источники, получаемые с использованием новой парадигмы, в которой эквивалентность исключена изначально.

### Эффекты классической электродинамики, объясненные геофизической электродинамикой

В геофизической электродинамике возможно объяснить ряд эффектов, возникающих в классической электродинамике. Среди таких эффектов можно назвать скин-эффект, суть которого состоит в том, что из-за индукции магнитным полем в проводящей среде электрических токов в противофазе первичному полю происходит погашение проникающего в проводящую среду первичного магнитного поля. Погашение препятствует проникновению первичного поля внутрь среды. Это явление и называется скин-эффектом, и возникает этот эффект в силовом магнитном

поле. В геофизической электродинамике кроме силового магнитного поля имеет место тороидальное несилловое, которое не возбуждает вторичных токов из-за  $\nabla \times \mathbf{H}_T = \mathbf{H}_p$ , отчего первичное тороидальное магнитное поле может проникнуть значительно глубже, чем это позволяет скин-эффект. Подобное явление может способствовать проведению сверхглубинного зондирования Земли в геофизической разведке.

Следующее явление объясняет «срыв» магнитного поля в тороидальной катушке токамака. В геофизической электродинамике это явление объясняется явлением взаимной генерации тороидальных и полоидальных магнитных полей при определенных условиях. Исследование этого явления в токамаках приведено в [4].

Выше в этой работе уже упоминался эффект Ааронова — Бома, который имеет теоретическое объяснение в геофизической электродинамике влиянием на квантовую частицу несиллового магнитного поля, которое является составной частью тороидального ортогонального разложения векторного потенциала. По мнению Фейнмана, в эффекте Ааронова — Бома играет роль векторный потенциал [6]. Геофизическая электродинамика утверждает, что в этом случае играет роль не сам потенциал, а его составляющая в разложении, представляющая собой, по существу, тороидальное несилловое магнитное поле по определению [4].

Интересное объяснение с точки зрения геофизической электродинамики представляет собой магнитное поле конденсаторов колебательных

контуров. Магнитное поле токов смещения в конденсаторе также является тороидальным несилловым магнитным полем. Оно не возбуждает токов в окружающих приборах из-за  $\nabla \times \mathbf{H}_T = \mathbf{H}_p$ . Поэтому обычно конденсаторы не экранируют. Зато явление само по себе показательно.

Долгое время в сейсмологии не могут найти физическое поле, которое бы выступало краткосрочным предвестником возникающих на Земле землетрясений. В работе [3] показано, что в геофизической электродинамике есть полоидальное электрическое поле зарядов, которые при подготовке землетрясения за счет перераспределения зарядов в очаге землетрясения может сообщить о готовящемся землетрясении путем нарастания напряженности полоидального электрического поля непосредственно перед землетрясением и его срывом буквально перед возникновением события [3].

### Заключение

Итак, физическое и математическое обоснования введения термина «геофизическая электродинамика» имеет подтверждение как в естественном электромагнитном поле Земли, так и в ряде давно известных классических эффектов в стандартной электродинамике Максвелла. Надеюсь, что небольшие, но принципиальные отличия одной электродинамики от другой (формулы (1) и (2)) позволят уменьшить число не объяснимых с точки зрения уравнений Максвелла эффектов, встречающихся как в теории, так и в экспериментах на поверхности Земли.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов В.В. Адаптация электродинамик Максвелла — Паркера — Моффата к электромагнитным полям, наблюдаемым в атмосфере Земли. // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60, № 3. С. 11—18.
2. Аксенов В.В. Пятнадцать теорем математической геофизики. Формулировки, доказательства, ссылки на публикации // Наука России: Цели и задачи. Сб. статей по материалам XX междунар. науч.-практич. конф. Ч. 2. 2020. С. 56—70.
3. Аксенов В.В. Электромагнитное поле Земли. 3-е изд., перераб. и дополн. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2010. 268 с.
4. Аксенов В.В. Тороидальное разложение векторного потенциала магнитного поля и его приложения // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015, № 6. С. 128—134.
5. Четаев Д.Н. Об обратной задаче теории магнитотеллурического зондирования // Физика Земли, 1966. № 9. С. 105—107.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэнс М. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1966. Вып. 6 (Электродинамика). 343 с.
7. Aaronov Y., Bohm D. Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory // Phys. Rev. 1959. Vol. 115. No. 3. P. 485—491.
8. Benkova N.P. Solar Diurnal variations of Terrestrial Magnetism // The Hydrometeorological service of USSR Transactions of Scientific Institutions. Terrestrial Magnetism. Series VI. Leningrad—Moscow: 1941. 75 p.
9. Van Vleuten A. Over de dagelijche variatie van het Ardmagnetisme // Koninklijk Ned. Meteor. Instit. 1917. No. 102. P. 5—30.
10. Larmor J. How could a rotating body such as the Sun become a magnet // Rep. Brit. Assoc. SCI. 1919. P. 60—159.
11. Stratton J. Ad. Electromagnetic Theory. Mc. Graw-Hill Book Company. New York — London, 1941. 539 p.
12. Moffat H.K. Generation of magnetic field in conducting

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

- medium // Cambridge University Press. 1978. 339 p.
13. *Cowling T.G.* Mgnetrohydrodynamics. John Willey and Sons. New York. 1957. 139 p.
14. *Chandrasekhar S.* On force-free magnetic fields // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1956. Vol. 42. No. 1. P. 1—5.
15. *Parker E.N.* Cosmical Magnetic Fields // Clarendon Press Oxford. 1997. Vol. 1. 608 p. Vol. 2. 479 p.

### REFERENCES

1. Aksenov V.V. Adaptation of Maxwell—Parker—Moffat electrodynamics to electromagnetic fields observed in the Earth's atmosphere. // *Izv. Universities. Physics.* 2017. Vol. 60, No. 3. pp. 11—18.
2. Aksenov V.V. Fifteen theorems of mathematical geophysics. Formulations, proofs, links to publications // *Science of Russia: Goals and objectives. Collection of articles based on the materials of the XX International scientific and Practical conference. Part 2.* 2020. pp. 56—70.
3. Aksenov V.V. Electromagnetic field of the Earth. 3rd ed., reprint. and the supplement. Novosibirsk: Ed. SB RAS, 2010, 268 p.
4. Aksenov V.V. Toroidal decomposition of the vector potential of the magnetic field and its applications // *Bulletin of Moscow State University. Series 3. Physics. Astronomy.* 2015, No. 6. pp. 128—134.
5. Chetaev D.N. On the inverse problem of the theory of magnetotelluric sounding // *Physics of the Earth,* 1966. No. 9. pp. 105—107.
6. Feynman R., Leighton R., Sands M. Feynman lectures on physics. M.: Mir, 1966. Issue 6 (Electrodynamics). 343 p.
7. Aaronov Y., Bohm D. Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory // *Phys. Rev.* 1959. Vol. 115. No. 3. P. 485—491.
8. Benkova N.P. Solar Diurnal variations of Terrestrial Magnetism // *The Hydrometeorological service of USSR Transactions of Scientific Institutions. Terrestrial Magnetism. Series VI.* Leningrad—Moscow: 1941. 75 p.
9. Van Vleuten A. Over de dagelijksche variatie van het Ardmagnetisme // *Koninklijk Ned. Meteor. Instit.* 1917. No. 102. P. 5—30.
10. Larmor J. How could a rotating body such as the Sun become a magnet // *Rep. Brit. Assoc. SCI.* 1919. P. 60—159.
11. Stratton J. Ad. Electromagnetic Theory. Mc. Graw-Hill Book Company. New York — London, 1941. 539 p.
12. Moffat H.K. Generation of magnetic field in conducting medium // Cambridge University Press. 1978. 339 p.
13. *Cowling T.G.* Mgnetrohydrodynamics. John Willey and Sons. New York. 1957. 139 p.
14. *Chandrasekhar S.* On force-free magnetic fields // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1956. Vol. 42. No. 1. P. 1—5.
15. *Parker E.N.* Cosmical Magnetic Fields // Clarendon Press Oxford. 1997. Vol. 1. 608 p. Vol. 2. 479 p.

### ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Аксенов В.В. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Valentin V. Aksenov — contributed to the development of the article concept, prepared the text, approved the final version of the manuscript and accepts responsibility for all aspects of the work.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Аксенов Валентин Васильевич** — профессор, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук.  
6, Морской проспект, г. Новосибирск 630090, Россия  
e-mail: [aksenov@omzg.sccc.ru](mailto:aksenov@omzg.sccc.ru)  
тел. +7 (913) 786-83-21  
SPIN-код: 4882-6199  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6405-7821>

**Valentin V. Aksenov** — Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS.  
6, Morskoy ave., Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [aksenov@omzg.sccc.ru](mailto:aksenov@omzg.sccc.ru)  
tel. +7 (913) 786-83-21  
SPIN-code: 4882-6199  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6405-7821>