УДК 550.344.385

К ПРОБЛЕМЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОЗМОЖНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ЛОКАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЯХ КОМПОНЕНТ ВЕКТОРА ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2021 г. А.Г. Григорян, Д.В. Лиходеев

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия Автор для переписки: А.Г. Григорян (e-mail: ag-grig@ifz.ru)

Вариации геомагнитного поля (солнечно-суточные, бухтообразные и др.), вызываемые внешними источниками, такими как ионосферные токи в слое E, токи протекающие в верхних слоях атмосферы, содержат в себе важную информацию о геодинамических процессах в земной коре. Для оценки изменения состояния геологической среды был использован параметр N(A) – отношение амплитуд вариаций напряженности геомагнитного поля, вызываемых внешним источником и измеренных синхронно на разных станциях. Расчетный параметр N(A) позволяет оценить пространственно-временные изменения в локальном отклике геомагнитного поля и изменения электропроводности, выделить зоны, где наиболее активно развивается геодинамический процесс, и в дальнейшем определить области подготовки очагов крупных землетрясений.

Показано, что для системы выбранных наблюдательных пунктов в Республике Армения изменения параметра N(A) вызваны, главным образом, индуцированной составляющей геомагнитного поля. Используя бухтообразные вариации с периодами 10–25, 25–60, 60–90 мин и Sq-вариации за 1986–1993 гг., были обнаружены аномальные изменения локального геомагнитного поля, отражающие активизацию различных геодинамических процессов на разных глубинах земной коры и верхней мантии в пределах исследуемой территории Республики Армения. Выявлены предвестники двух сильных землетрясений – Парванийского (13.05.1986 г., M=5.3) и Спитакского (07.12.1988 г., M=7.0).

Методика применена также в районе Эльбрусского вулканического центра в пунктах наблюдения "Баксан" и "Кубань". Изучены бухтообразные вариации с периодами 10–25, 25–60 мин и Sq-вариации за период 2011–2013 гг. Небольшие величины аномалий параметра N(A) указывают на незначительные изменения электромагнитных параметров в районе точек наблюдения, что говорит о слабых вариациях флюидного режима геологической среды в районе Эльбрусского вулкана и подтверждается данными других наблюдений.

Исследования локальных изменений параметра N(A) позволяют контролировать процессы в геологической среде, связанные с напряженно-деформированным состоянием и динамикой флюидного режима. Это важно для поиска предвестников землетрясений и извержений вулканов.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, аномальные вариации геомагнитного поля, геодинамические процессы, подготовка крупных сейсмических событий, глубинные флюидодинамические системы, региональная сейсмичность.

Введение

Сейсмотектонический процесс порождает неоднородное напряженно-деформированное состояние геологической среды [Добровольский, 1984]. Оно отражается в пространственных вариациях геофизических полей [Соболев, 1993], в частности, в геомагнитном поле и вызывает изменения определенного типа [Безуглая и др., 1986]. Хотя природа геомагнитных вариаций не всегда очевидна, анализ динамики их развития позволяет выявить пространственно-временные изменения электромагнитной индукции на разных глубинах земной коры, что является своеобразным признаком изменения глубинного состояния геологической среды [Сковородкин, 1985; Ваньян, Хайдман, 1996; Григорян, 2007].

Электромагнитная индукция, создаваемая в Земле Sq- и бухтообразными вариациями, характеризует состояние среды, так как величина локального магнитного отклика среды на внешние вариации зависит от электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости слагающих ее структур.

Развитие геодинамических процессов, которые сопровождаются изменением напряженно-деформационного состояния земной коры и накоплением сейсмогенерирующей энергии, проявляется в изменениях физических параметров различных геофизических полей, доступных нашему наблюдению. В настоящей работе приведены результаты исследований этого процесса с помощью использования вариаций геомагнитного поля, создаваемых внешним источником.

Изменения амплитудно-частотного состава вариаций магнитного поля происходит как за счет флуктуации внешнего источника, так и за счет изменения магнитных и электрических свойств геологической среды. Флуктуации внешнего источника связаны с образованием новых токовых систем. Взаимодействие солнечных корпускулярных потоков с магнитным полем Земли порождает сложные токовые системы, являющиеся одним из источников локальных геомагнитных вариаций, которые наблюдаются на поверхности Земли [*Yamazaki, Rikitake,* 1970; *Яновский,* 1978].

Для решения многих научных и прикладных задач, связанных с изучением геомагнитного поля, необходимо разделять его на части, обусловленные различными источниками. Установлено, что в слое *E* ионосферы на высотах между 90 и 130 км текут электрические токи, которые вызывают вариации магнитного поля спокойных типов (солнечно- и лунно-суточные). Эти вариации обнаруживаются в средних и низких широтах и далее называются вариациями, вызванными внешними источниками – δH^e . Переменное магнитное поле внешнего происхождения во всем спектре геомагнитных вариаций индуцирует внутри проводящей Земли электрические токи, которые в свою очередь сами становятся источниками изменения магнитного поля. Такие вариации будем называть вариациями, вызванными внутренними источниками, и обозначать как δH^i . Считается, что в среднем две трети амплитуды суммарной вариации δH^H геомагнитного поля на поверхности Земли обусловлены внешними, а оставшаяся треть – внутренними источниками [*Яновский*, 1964].

Наибольший интерес для геофизических приложений представляют низкочастотные электромагнитные поля, которые связаны с крупномасштабными тектоническими процессами, приводящими к деформациям и разрушению локальных объемов земной коры [Сковородкин, 1985; Сковородкин, Тоноян, 1986; Григорян, 2007].

Методика исследований

Для оценки аномалий локального геомагнитного поля часто используется синхронная разность ΔT [*Яновский*, 1978] высокоточных измерений модуля поля, определенная для нескольких пар станций [*Сковородкин и др.*, 1985]. Но данная величина отражает лишь суммарные вариации геомагнитного поля δH^{H} . Выделить и оценить изменения электропроводности коры из суммарных вариаций геомагнитного поля только с помощью ΔT почти невозможно. Для решения этой задачи Ю.П. Сковородкиным в 1980-е гг. был внедрен расчетный параметр N(A), который представляет собой отношение амплитуд синхронно измеренных на разных станциях вариаций δ*H*_T, создаваемых внешним источником [*Сковородкин*, *Тононян*, 1986]:

$$N(A) = A_i / A_j , \tag{1}$$

где A_i и A_j амплитуды вариаций геомагнитного поля δH_T на пунктах *i* и *j* соответственно. С помощью параметра N(A) можно выявить локальные изменения электропроводности геологической среды, обусловленные активизацией различных геодинамических процессов.

Электромагнитная индукция, создаваемая в Земле *Sq*- и бухтообразными вариациями, зависит от пространственно-временной структуры внешних источников. Следовательно, возникает вопрос о временной устойчивости индуцированного внешними источниками поля на исследуемой территории.

Вариации переменного магнитного поля δH^{H} , которые регистрируются инструментально на поверхности земли, являются суммой составляющих, вызванных внешними δH^{e} и внутренними δH^{i} источниками:

$$\delta H^H = \delta H^e + \delta H^i. \tag{2}$$

Оценим вклад составляющей поля δH^e в изменения δH^H . В конечном счете, вопрос сводится к рассмотрению связи вариаций внешнего поля с географической широтой и местным временем, что было выполнено и подробно изложено в работе [*Сковородкин*, *Тоноян*, 1986].

Пример записи *Sq*- и бухтообразных вариаций переменного магнитного поля, полученных с помощью цифровых магнитометров, приведен на рис. 1.



Рис. 1. Запись Sq- (1) и бухтообразных (2) вариаций компоненты δH переменного геомагнитного поля, полученная 11–12.09.2013 г. на станции "Баксан". Штриховыми линиями обозначены амплитуды выбранных вариаций; max₁, max₂ и min – их экстремальные значения

Fig. 1. Record of the Sq- (1) and bay-like (2) variations of the δH component of alternating geomagnetic field, obtained on September 11–12, 2013 at the "Baksan" station. The dashed lines indicate the amplitudes of the selected variations; max₁, max₂ and min – their extreme values

Для выявления отличий в амплитудах вариаций на разных станциях вычисляются вариации δH_X , δH_Y , δH_Z для каждой из пространственных компонент полного вектора δH_T геомагнитного поля [Безуглая и др., 1986; Сковородкин, Тоноян, 1986]. Впервые такие расчеты были проведены под руководством профессора Ю.П. Сковородкина для

широт Таджикской ССР (38–40° с.ш.), с полным охватом по сферическим угловым координатам пунктов наблюдений $\Delta \theta = (\theta - \theta_0) = 2.5^\circ$. С помощью этих работ было показано, что пространственно-временную структуру поля *Sq*-вариаций (поля внешнего происхождения) можно считать однородной. Исходя из этого, можно предположить, что неоднородность внешнего поля не вносит заметных искажений в вариации переменного геомагнитного поля δH^H , регистрируемого на поверхности Земли, и, следовательно, в расчет параметра *N*(*A*). Максимальное расхождение имела *x*-составляющая δH_X – не более 3.0 нТл, тогда как δH_Y достигала 0.28 нТл, а δH_Z – 0.34 нТл. Эти расхождения соответствуют паре самых удаленных станций с учетом реальной наблюдаемой амплитуды *Sq*-вариаций.

Станции магнитовариационного мониторинга в Республике Армения

Для изучения вариаций низкочастотных электромагнитных полей в 1986 г. в районе населенных пунктов Джрадзор, Товуз и Гарни (Республика Армения) была создана сеть станций для геомагнитных наблюдений (рис. 2).



Рис. 2. Расположение магнитовариационных станций на территории Республики Армения. Кружками обозначены крупные населенные пункты; треугольниками – магнитовариационные станции; звездочкой – эпицентр Спитакского землетрясения

Fig. 2. Location of geomagnetic-variation stations on the territory of the Republic of Armenia. The circles indicate large settlements; triangles – geomagnetic-variation stations; an asterisk – the epicenter of the Spitak earthquake

Эпицентр Парванийского землетрясения на рис. 2 не указан, поскольку он расположен за пределами карты. Озеро Парвана, около которого находился эпицентр землетрясения, расположено менее чем в 100 км на северо-запад от станции "Джрадзор", на границе Грузии и Армении.

9

В районах указанных населенных пунктов были установлены три трехкомпонентные аналоговые магнитовариационные станции системы Боброва MBC-3, которые обеспечили круглосуточные наблюдения за пространственными компонентами δH_Z , δH_H и δH_D вектора переменного магнитного поля δH_T . Записи проводились на бумажных фотолентах, скорость регистрации данных на ленте составляла 1.33 мм/мин. Разрешение аппаратуры, т.е. минимальный полезный сигнал, регистрируемый прибором, составляло 1 мм, что соответствует 0.5–0.8 нТл.

Разница в местном солнечном времени, обусловленная расположением измерительной аппаратуры на разной долготе, учитывалась при обработке данных (максимальная разница по долготе составила около 7').

Станция "Джрадзор" (см. рис. 2) находится в зоне высокой контрастности новейших тектонических движений с дифференцированными блоковыми поднятиями и относительными опусканиями, выраженными в рельефе преимущественно обращенными формами. Зона является одной из крупных и сложных зон разрывных нарушений мегантиклинория Малого Кавказа [Габриелян, Саркисян, Симонян, 1981].

Станция "Гарни" расположена в Веди-Айоцдзорской подзоне дифференцированных, унаследованных с олигоцена и миоцена и отраженных в рельефе в прямой форме антиклинальных (горст-антиклинали и грабен-синклинали) поднятий.

Станция "Товуз" находится на блоке Шамшадинского антиклинория, который относится с сейсмической точки зрения к спокойной зоне, что и позволяет использовать ее как базисную станцию. После Спитакского землетрясения станции работали с существенными перерывами, но нами были обработаны все доступные записи за период 1986–1993 гг. Правильный выбор расположения станций способствовал выявлению предвестников двух крупных землетрясений на севере Армении – Парванийского (13.05.1986 г., *M*=5.3) и Спитакского (07.12.1988 г., *M*=7.0).

Расчет параметров, характеризующих вариации

Принимая во внимание, что координаты станций, расположенных на территории Армении и Таджикистана, лежат в одном и том же широтном диапазоне, вышеизложенную методику анализа можно применить для Sq-вариаций, зарегистрированных на территории Армении [Григорян, 2007; Сковородкин, Григорян, 1998; Grigorian, Skovopodkin, Nazaretian, 1999]. Отметим, что методику принципиально можно применять только для средних широт, где хорошо выделяются бухтообразные и Sq-вариации.

В целях получения более подробной информации об изменениях электромагнитной индукции на разных глубинных горизонтах земной коры, кроме Sq-вариаций изучались также бухтообразные вариации разных периодов для вертикальной и горизонтальных компонент [Григорян, 2005, 2007; Сковородкин, Григорян, 1998; Grigorian, Skovopodkin, Nazaretian, 1999].

Чтобы оценить для бухтообразных вариаций вклад поля внешнего источника в изменение параметра N(A), возникающее за счет δH^e , проводились расчеты с учетом координат станций "Джрадзор", "Товуз" и "Гарни".

Магнитное поле, создаваемое линейным током, расположенным на высоте *h* от поверхности Земли, может быть определено с помощью закона Био–Савара [*Яновский*, 1978]:

$$\delta H_T = \frac{2I}{c} \frac{[l,r]}{r^3},\tag{3}$$

где δH_T – магнитное поле, создаваемое линейными токами; l – единичный вектор в направлении линейного тока I; r – расстояние от рассматриваемой точки P до линейного тока (рис. 3); c –коэффициент для связи систем единиц (c=1 для системы СИ).



Рис. 3. К выводу поля линейного тока. Пояснения обозначений см. в тексте

Fig. 3. Derivation of the linear current field. For explanations of notations, see the text

Горизонтальная δH_H и вертикальная δH_Z составляющие этого поля вычисляются следующим образом:

$$\delta H_H = \frac{2I}{c} \frac{h}{h^2 + x^2}, \quad \delta H_Z = \frac{2I}{c} \frac{x}{h^2 + x^2}.$$
 (4)

Графики бухтообразных вариаций для этих составляющих магнитного поля на всех станциях, находящихся вблизи одного меридиана, но на различных широтах, почти совпадают по виду. Высота h расположения линейного тока легко вычисляется в предположении, что бухтообразные вариации вызываются исключительно током, протекающим в верхних слоях атмосферы (см. рис. 3). Для определения h строятся векторы напряженности поля в точках, расположенных по меридиану вблизи рассматриваемой параллели, и затем к ним строятся перпендикуляры. Точка пересечения перпендикуляров и дает высоту h линейного тока [Яновский, 1978].

Силу тока I получают из формул (4), положив x=0,

$$\frac{I}{c} = \frac{\delta H_H h}{2},\tag{5}$$

где δH_H – напряженность поля *DPI*. Полем с индексом *DPI* обозначают класс магнитных возмущений, с максимальной интенсивностью проявляющихся в авроральной зоне в виде положительных и отрицательных отклонений от спокойного уровня – так называемых магнитных бухт [*Яновский*, 1978]. В итоге для силы тока получается значение *I*~105 A, т.е. порядка ста тысяч ампер, при высоте *h*>100 км. Приведенные расчеты справедливы, когда расстояние между точками *P* и *Q* (см. рис. 3) малы по сравнению с размерами контура (т.е. длиной окружности соответствующей параллели).

Определив *x* с учетом координат рассматриваемых станций магнитовариционной сети Армении (см. рис. 2), получаем в соответствии с формулами (4) и (5) сначала:

$$\delta H_{H(Дж)} = 24.4$$
 нТл,
 $\delta H_{H(Тов)} = 24.47$ нТл,
 $\delta H_{H(Гар)} = 23.21$ нТл.

Здесь $\delta H_{H(Дж)}$, $\delta H_{H(ToB)}$ и $\delta H_{H(Гap)}$ – горизонтальные составляющие геомагнитного поля, определенные на станциях "Джрадзор", "Товуз" и "Гарни", соответственно. Затем можно вычислить значения параметра N(A):

$$N(A)_{H1} = H_{H(\mbox{μ}\mbox{μ})}/H_{H(\mbox{To$}\mbox{$n$})} = 24.4/24.47 = 0.997;$$

 $N(A)_{H2} = H_{H(\mbox{$\mu$}\mbox{$\mu$})}/H_{H(\mbox{$\Gammao}\mbox{n})} = 24.4/23.21 = 1.05;$
 $N(A)_{H3} = H_{H(\mbox{$\Gammaa}\mbox{n})}/H_{H(\mbox{To$}\mbox{$n$})} = 23.21/24.47 = 0.95.$

Параметры N(A) для вертикальной составляющей геомагнитного поля – $N(A)_Z$, рассчитанные тем же способом для тех же пар станций [*Григорян и др.*, 1999], представлены в табл. 1.

Таблица 1. Возможные изменения параметров $N(A)_H$ и $N(A)_Z$ за счет внешней составляющей δH^e , рассчитанные по бухтообразным вариациям для всех пар магнитовариационных станций Армении

Параметр	Пара станций		
	"Джрадзор"–"Товуз"	"Джрадзор"–"Гарни"	"Гарни"–"Товуз"
$N(A)_H$	0.997	1.05	0.95
$N(A)_Z$	0.999	1.0257	0.9739

Оценки с учетом координат станций и уровня активности позволяют считать, что временные изменения в $N(A)_Z$ и $N(A)_H$ в магнитоспокойные дни за счет неоднородности или различия в δH^e для бухтообразных вариаций не превышают 5 %. Можно принять, что изменения среднемесячных значений параметра N(A) за счет внешней составляющей δH^e в нашем случае не выходят за пределы ±0.05 от расчетных значений (см. табл. 1) [Григорян, Сковородкин, Ахвердян, 1999].

Благодаря непрерывным наблюдениям в 1986–1993 гг. был получен уникальный материал, который позволил более подробно изучить геодинамические процессы в земной коре на территории Армении с использованием данной методики.

Период вариаций т является важнейшей характеристикой во всех задачах электромагнитного зондирования, так как этот параметр определяет глубину проникновения вариаций (толщину скин-слоя ∂). Чтобы найти величину ∂ авторы работы [*Безуглая и др.*, 1986] использовали известную в электроразведке зависимость (в системе СИ)

$$\partial = 159\sqrt{10\rho\tau} , \qquad (6)$$

в которой ρ – удельное электрическое сопротивление; τ – период геомагнитных вариаций. Расчеты показывают, что глубина проникновения поля вариаций составляет до 280 км для *Sq*-вариаций с периодом 5–10 ч, 2–8 км для вариаций с периодом 5–25 мин и 10–20 км для вариаций с периодом 30–60 мин.

Использование Sq-вариаций дало возможность авторам работы [Безуглая и др., 1986] изучить изменение электропроводности всей земной коры и верхней мантии. Так как внешний источник геомагнитных вариаций (токовые системы) находится в ионосфере на широте примерно 20° с.ш., а пункты наблюдения в Таджикистане и в Армении на широтах от 38° до 40° с.ш., то можно предположить, что суточный ход Sq-вариаций между пунктами наблюдений существенно не должен различаться [Сковородкин, Тоноян, 1986].

Обработка данных

На магнитограммах всех станций выбирались синхронные Sq- или бухтообразные вариации вышеуказанных периодов для всех компонент, и группировались по этим периодам. Амплитуды вариаций вычислялись по формуле

$$4\delta H = (\delta H_{\text{max1}} + \delta H_{\text{max2}} - 2\delta H_{\text{min}})/2, \tag{7}$$

в которой δH_{max1} , δH_{max2} и δH_{min} – экстремальные значения выбранных вариаций. Расчет амплитуд для вертикальных и горизонтальных компонент поля производился раздельно.

Определение параметра N(A) начиналось с вычисления отношений найденных амплитуд синхронно измеренных вариаций (между всеми возможными парами пунктов наблюдений): $N(A)_{i,j} = A_i/A_j$ на разных *i*, *j*-парах станций для одних и тех же часов одного и того же дня. При обработке оказалось, что отношения амплитуд вариаций с положительным или отрицательным знаком примерно одной и той же величины.

Отметим, что для обеспечения точности полученных результатов рекомендуется выбирать не менее пяти бухт за месяц. Для каждого периода и месяца вычислялись среднемесячные значения параметра N(A):

$$N(A)_{i,j} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} N_k(A)_{i,j}, \qquad (8)$$

где *m* – число случаев наблюдения *Sq*- или бухтообразных вариаций за месяц в спокойные дни.

Максимальные и минимальные значения параметра N(A), полученные в итоге обработки данных, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Максимальные и минимальные значения параметра $N(A)$, обусловленные
индуцированной составляющей δH^i , рассчитанные для Sq- и бухтообразных вариаций
за период 1986–1988 гг. для вертикальной (<i>N</i> (<i>A</i>) _{<i>H</i>}) и горизонтальной (<i>N</i> (<i>A</i>) _{<i>Z</i>}) составляющих
геомагнитного поля

Тип вариаций	Значения параметра N(A)			
пара станций	$N(A)_{H},$	$N(A)_{H},$	$N(A)_Z,$	$N(A)_Z,$
	максимальное	минимальное	максимальное	минимальное
<i>Sq</i> -вариации, "Джрадзор"–"Товуз"	1.22	0.54	1.25	0.59
<i>Sq</i> -вариации, "Джрадзор"–"Гарни"	1.09	0.72	0.99	0.58
<i>Sq</i> -вариации, "Гарни"–"Товуз"	1.2	0.93	1.27	0.93
Бухтообразные, период 30–60 мин, "Джрадзор"–"Товуз"	1.33±0.09	0.73±0.08	1.34±0.09	0.54±0.09
Бухтообразные, период 10–25 мин, "Джрадзор"–"Товуз"	1.28±0.18	0.68±0.1	1.37±0.26	0.53±0.16

Для сравнения полученных результатов дополнительно были рассчитаны также среднемесячные значения синхронной разности $\Delta\delta T$ для тех же пар станций (рис. 4):

$$\Delta \delta T(t) = \delta T_i(t) - \delta T_j(t), \tag{9}$$

где δT – значение геомагнитного поля; индексы *i* или *j* соответствуют разным пунктам наблюдений; *t* – время наблюдений.

Графики изменений среднемесячных значений параметра N(A) представлены на рис. 5, 6. Очевидные аномальные изменения $\Delta\delta T$ во времени совпадают с аномальными изменениями параметра N(A) (см. рис. 4–6).



Рис. 4. Сглаженные временные ряды среднемесячных значений синхронной разности $\Delta\delta T$ между станциями "Джрадзор" и "Товуз" за период 1986–1988 гг. для вариаций с периодами: 5–25 мин (серая кривая) и 30–60 мин (черная кривая). Здесь и на рис. 5, 6 стрелками отмечены моменты Парванийского (*M*=5.3) и Спитакского (*M*=7.0) землетрясений; на горизонтальных осях – календарные годы

Fig. 4. Smoothed time series of monthly mean values of the synchronous difference $\Delta\delta T$ between "Jradzor" and "Tovuz" stations for the period of 1986–1988, for variations with periods: 5–25 min (gray curve) and 30–60 min (black curve). Here and in Fig. 5, 6 arrows mark the moments of the Parvani (M=5.3) and Spitak (M=7.0) earthquakes; calendar years postponed on horizontal axes



Рис. 5. Изменение среднемесячных значений параметров $N(A)_H$, $N(A)_D$, $N(A)_Z$, рассчитанных по *Sq*-вариациям для горизонтальных и вертикальных составляющих геомагнитного поля между станциями "Джрадзор" и "Товуз" за период 1986–1993 гг.

Fig. 5. Changes in monthly mean values of the parameters $N(A)_H$, $N(A)_D$, $N(A)_Z$, calculated from the *Sq*-variations for the horizontal and vertical components of the geomagnetic field between "Jradzor" and "Tovuz" stations for the period of 1986–1993



Рис. 6. Изменение среднемесячных значений параметров $N(A)_H$ и $N(A)_Z$, рассчитанных по бухтообразным вариациям с периодами 5–25 мин (*внизу*) и 30–60 мин (*вверху*) для горизонтальной и вертикальной составляющей геомагнитного поля между станциями "Джрадзор" и "Товуз" за период 1986–1988 гг. Вертикальными отрезками отображены отклонения данных от среднемесячных значений, взятых отдельно для каждого месяца

Fig. 6. Change in monthly mean values of the parameters $N(A)_H$ and $N(A)_Z$, calculated from bay-like variations with periods of 5–25 min (*below*) and 30–60 min (*above*) for the horizontal and vertical components of the geomagnetic field between stations "Jradzor" and "Tovuz" for the period of 1986–1988. Vertical segments show the deviations of the data from monthly average values taken separately for each month

Обсуждение результатов, полученных для территории Армении

Анализ данных магнитовариационных станций, расположенных в Армении, одна из которых находится вблизи зоны сейсмотектонической активности (станция "Товуз"), а другие удалены от этой зоны, позволил выявить эффекты, связанные с изменением проводимости. В свою очередь, это дало возможность обнаружить области подготовки очагов крупных землетрясений.

За время наблюдений 1986–1989 гг. происходили разнопериодные флуктуации параметра N(A), превышающие возможные инструментальные ошибки. Наибольшие флуктуации наблюдались в магнитовозмущенные периоды, характеризующиеся индексами активности $A_P \ge 25$, $C_P \ge 1.0$ и $K_P \ge 4$. Такие случаи были исключены из массива данных.

Анализируя табл. 2 можно видеть, что с учетом ошибок разница между максимальными и минимальными значениями N(A), в пределах которой происходят изменения, существенно превышает расчетные значения, полученные для внешней δH^e индуцирующей составляющей переменного магнитного поля (см. табл. 1). Следовательно, изменения параметра N(A) главным образом вызваны индуцированной δH^i составляющей. Самые значительные изменения зафиксированы между станциями "Джрадзор" и "Товуз". Максимальные изменения параметра N(A) с учетом погрешностей измерения достигают 35 % [Григорян, Сковородкин, Ахвердян, 1999; Григорян, 2007; Grigorian, Skovopodkin, Nazaretian, 1999].

На графиках $\Delta\delta T$ и параметра N(A) для Sq-вариаций (см. рис. 4, 5) хорошо выделяются локальные изменения переменного геомагнитного поля. На рис. 4 невооруженным глазом видно, что резкие изменения начались в середине 1987 г. – кривая, соответствующая вариациям с периодом 30–60 мин и отражающая изменения на глубине 10–20 км. Через два–три месяца эти изменения проявились на кривой, соответствующей вариациям с периодом 5–25 мин и отражающей изменения на глубине 3–8 км. Это позволяет заключить, что процесс, проходящий в земной коре, начался с глубины и развивался снизу вверх.

Изменения переменного геомагнитного поля до границы кора-мантия отражены на рис. 5, где представлены значения параметра N(A), рассчитанного по Sq-вариациям для вертикальной и горизонтальной составляющих геомагнитного поля между станциями "Джрадзор"-"Товуз". Значительные изменения параметров мантии начались примерно за два года до Спитакского землетрясения. Принимая во внимание наличие аномалии в низкочастотной области (Sq-вариации) и расчеты среднемесячных значений синхронной разности $\Delta\delta T$ между станциями "Джрадзор" и "Товуз"для вариаций с периодами 5–25 и 30–60 мин за 1986–1988 гг., можно предположить активизацию флюидного режима на большой глубине, например, поступление флюидов из области корамантия за счет процессов, происходящих в мантии [Григорян, Сковородкин, 1998], с запозданием на один год.

По рис. 5 можно судить об обратимости процесса изменения электрических параметров среды, поскольку величина параметра N(A) постепенно возвращается на прежний уровень, который был до Спитакского землетрясения.

Аномальные изменения параметра на N(A) (см. рис. 5, 6) и $\Delta\delta T$ (см. рис. 4) очевидны, и предполагается, что они связаны с развитием геодинамических процессов, сопровождавших подготовку Парванийского и Спитакского землетрясений [Григорян, 2007; Grigorian, Skovopodkin, Nazaretian, 1999].

Применение методики для района Эльбрусского вулканического центра

Эльбрусский вулканический центр и его окрестности относятся к весьма активным, с геологической точки зрения, регионам планеты [*Собисевич*, 2013], что является предпосылкой для применения разработанной методики в этом районе.

Параметр N(A) помогает оценить изменения электродинамических параметров геологической среды, зависящие от флюидодинамических процессов и обусловленные эволюцией магматических структур вулкана Эльбрус. Расчет параметра N(A) в режиме, близком к реальному времени, даст возможность организовать мониторинг вулканической опасности в районе Эльбрусского вулканического центра.

Новые научные результаты, полученные в последние годы, позволяют утверждать, что вулкан Эльбрус находится в активной стадии развития (отнесен к классу "*A*" в каталоге действующих вулканов, с датировкой извержений в историческое время). Однако полное представление о происходящих процессах, протекающих в магматической питающей системе, можно получить только с помощью технологий многопараметрического геофизического мониторинга [*Собисевич*, 2013]. Геофизические работы по Приэльбрусскому геолого-геофизическому профилю показали, что выделенные магнитотеллурическим зондированием области аномально высокой электропроводности на глубинах 5–10 и 35–50 км под вулканической постройкой Эльбруса обусловлены возможным присутствием магматических расплавов. Параметры аномалии свидетельствуют в пользу глубинного залегания некоторых из разрывных нарушений и реальности существования предполагаемой под вулканом Эльбрус магматической камеры, а на более глубоких уровнях – и магматического очага [*Нечаев*, 2010].

В настоящее время удалось подтвердить несколькими независимыми методами наличие магматических образований в пределах Эльбрусского вулканического центра, а также определить их характерные размеры и пространственное местоположение [Лиходеев и др., 2017].

Применение расчетного параметра N(A) позволяет наблюдать за динамикой магматических камер в районе вулканической постройки Эльбруса. На Северном Кавказе в районе Эльбрусского вулканического центра создан "научный полигон" – полномасштабная геофизическая обсерватория для непрерывного мониторинга геодинамических процессов в районе вулканической постройки и на прилегающих территориях (рис. 7).



Рис. 7. Расположение магнитовариационных станций в районе Эльбрусского вулканического центра. Треугольниками отмечено положение магнитовариационных станций, кружками – землетрясения (размер кружка отражает магнитуду, оттенок серой заливки – глубину событий в соответствии с легендой), кружки с белым контуром – землетрясения без указания глубины

Fig. 7. Location of geomagnetic-variation stations in the area of the Elbrus volcanic center. The triangles mark the position of the geomagnetic-variation stations, circles – earthquakes (size of circle reflects magnitude, shade of gray filling – depth in accordance with the legend), circles with a white outline – earthquakes without depth indication

В рассматриваемом районе установлены трехкомпонентные цифровые магнитовариационные станции "Баксан" и "Кубань", которые круглосуточно записывают значения вертикальной и горизонтальной составляющих геомагнитного поля [Канониди, Канониди, Петров, 2015].

Образец первичных данных одной из горизонтальных компонент магнитного поля, зарегистрированных на трехкомпонентной цифровой магнитовариационной станции в районе Эльбрусского центра, представлен в табл. 3.

Время,	Измеренное значение
Ч:МИН	компоненты магнитного поля <i>H</i> , нTл
0:00	24121.1231100461
0:01	24120.4276464991
0:02	24120.2278051017
0:03	24120.4276464991
0:04	24120.6235064519
0:05	24120.6235064519
0:06	24120.5196046851
0:07	24120.4157033
0:08	24120.4117230614
0:09	24120.6036054241
0:10	24120.6876129185

Таблица 3. Образец первичных данных, зарегистрированных 14.07.2008	Г.
трехкомпонентной цифровой магнитовариационной станцией	

В результате применения разработанной методики в указанном районе были получены графики изменения среднемесячного значения параметра N(A) за 2012–2013 гг. (рис. 8, 9), на которых показаны временные изменения этого параметра для вертикальной и горизонтальной составляющих геомагнитного поля для всех изученных периодов. Небольшие изменения параметра N(A) указывают на изменения проводимости, происходящие в районе вулканической постройки Эльбруса, что говорит об активности магматической питающей системы данного вулкана. Эти изменения временные и небольшие, так как сейсмичность Северного Кавказа за период 2012–2013 гг. относительно невелика – это видно из графика суммарной сейсмической энергии.

Гипоцентры землетрясений в районе исследований с магнитудой *М*≥4 в радиусе 155 км от станции "Баксан" (табл. 4) в основном расположены на глубине 3–20 км [*Габсатарова, Борисов,* 2017; *Маловичко и др.,* 2014].

Таблица 4. Глубина гипоцентров и количество землетрясений с магнитудой *М*≥4 в радиусе 155 км от станции "Баксан" за 2012–2013 гг.

Глубина	Соответствующий период	Количество
гипоцентра, км	геомагнитных вариаций, мин	землетрясений
1–8	5–25	150
8–20	25–60	200
20-30	60–90	50

Сравнивая и анализируя расчетные и полученные в результате обработки значения параметра N(A), можно заметить, что различие значений параметра N(A) в основном



Рис. 8. Изменения среднемесячного значения параметра $N(A)_H$, рассчитанного для пары станций "Баксан"–"Кубань" за 2012–2013 гг. по бухтообразным вариациям разных периодов (указаны над графиками I–III), Sq-вариациям (IV). Серые линии – тренды изменений параметра $N(A)_H$, V – суммарная сейсмическая энергия (E, Дж), выделившаяся за каждый месяц для локальных землетрясений с магнитудой $M \ge 4$; на горизонтальных осях – календарные месяцы

Fig. 8. Changes in monthly mean value of the parameter $N(A)_H$ calculated for the pair of stations "Baksan"–"Kuban" for 2012–2013 by bay-like variations of different periods (indicated above graphs I–III), *Sq*-variations (IV). Gray lines are trends of changes in the $N(A)_H$ parameter; plot V is the total seismic energy (*E*, J) released for each month for local earthquakes with a magnitude of $M \ge 4$; calendar months postponed on horizontal axes



Рис. 9. Изменения среднемесячного значения параметра $N(A)_Z$, рассчитанного для пары станций "Баксан"—"Кубань" за 2012–2013 гг. по бухтообразным вариациям разных периодов (указаны над графиками I–III), и суммарная сейсмическая энергия (E, Дж), выделившаяся за каждый месяц для локальных землетрясений с магнитудой $M \ge 4$ в радиусе 155 км от станции "Баксан" (IV). Серые линии – тренды изменений параметра $N(A)_Z$; на горизонтальных осях – календарные месяцы

Fig. 9. Changes in monthly mean value of the parameter $N(A)_Z$, calculated for the pair of stations "Baksan"–"Kuban" for 2012–2013 by bay-like variations of different periods (indicated above graphs I–III), and the total seismic energy (*E*, J) released for each month for local earthquakes with a magnitude of $M \ge 4$ within a radius of 155 km from the "Baksan" station (IV). Gray lines are trends of changes in $N(A)_Z$ parameter; calendar months postponed on horizontal axes

обусловлены локальными изменениями индуцированных компонент в изучаемых районах. Использованные нами периоды геомагнитных вариаций достаточно велики, что позволяет в дальнейшем пренебречь токами смещения [*Рокитянский и др.*, 1982]. Тогда основные уравнения электромагнетизма можно записать в виде:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = 4\pi\vec{i}, \ \operatorname{rot}\vec{E} = \frac{\partial\vec{H}}{\partial t}, \ \vec{i} = \sigma\vec{E};$$
(10)

для изотропной среды дополнительно можно записать:

$$\vec{H} = \frac{\beta}{\mu},\tag{11}$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{i} – плотность тока; $\vec{\beta}$ – магнитная индукция; μ – магнитная проницаемость; σ – электрическая проводимость.

Изменение индуцированного поля δH может быть вызвано изменениями \vec{E} , \vec{i} , σ , μ . Возникает естественный вопрос – какие же процессы в Земле могли бы вызвать достаточные по величине локальные изменения указанных параметров за периоды протяженностью от месяцев до нескольких лет?

Одна из возможных причин изменений электропроводности – дегазация Земли и вертикальная фильтрация флюидов в верхних слоях земной коры [Киссин, 2015; Гуфельд, 2012; Назаретян и др., 2015]. Выделяются две принципиально разные флюидные системы: водородно-углеродная и водородно-сернистая [Киссин, 2015]. Водородно-сернистая флюидная система служит основой формирования скоплений сульфидов и сернисто-сероводородных систем в земной коре [Гуфельд, 2012].

Вертикальная фильтрация флюидов происходит через глубинные разломы, которые имеются на исследуемых территориях. Поток флюидов сильно меняет физические свойства геологической среды. Вследствие изменения флюидонасыщенности среды, меняется электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость, плотность тока и напряженность магнитного поля [Гуфельд, 2012; Киссин, 2011].

Заключение

Изучение локальных изменений параметра N(A) позволило оценить изменения электропроводности геологической среды, которые связаны с развитием геодинамических процессов в земной коре.

Аномальные изменения параметра N(A) за период 1986–1993 гг. на территории Армении [Григорян, 2005, 2007] можно считать предвестниками двух крупных землетрясений – Парванийского (13.05.1986 г., M=5.3) и Спитакского (07.12.1988 г., M=7.0).

Анализ бухтообразных вариаций разных периодов позволил определить направление геодинамического процесса (от границы кора—мантия до верхних слоев коры) перед Спитакским землетрясением 1988 г., а также зафиксировать его обратимость. При наличии трех и более наблюдательных пунктов параметр N(A) можно использовать для выявления районов возможной подготовки сильных землетрясений.

Статья посвящается 30-летию Спитакского землетрясения 07.12.1988 г.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук при финансовой поддержке гранта Президента Российской федерации для поддержки ведущих научных школ № НШ-5545.2018.5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Безуглая Л.С., Прохоров А.А., Сковородкин Ю.П., Тоноян Е.П. Использование Sq-вариаций для изучения сейсмотектонического процесса // Докл. АН Арм. ССР. 1986. Т. 82, № 1. С.33–37.
- Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д. О природе электропроводности // Физика Земли. 1996. № 4. С.5–11.
- Габриелян А.А., Саркисян О.А., Симонян Г.П. Сейсмотектоника Армянской ССР. Ереван: Ереванский университет, 1981. 284 с.
- Габсатарова И.П., Борисов П.А. Современный сводный каталог землетрясений Кавказа: проблемы создания и пути совершенствования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С.105–109.
- Григорян А.Г. Аномальные изменения электромагнитной индукции как предвестник сильных землетрясений // Геофизика XXI столетия: Сборник трудов Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: ООО "Изд-во ГЕРС", 2005. С.198–205.
- *Григорян А.Г.* Изменения локального геомагнитного поля внешнего происхождения на примере Армении // Физика Земли. 2007. № 6. С.88–95.
- Григорян А.Г., Назаретян С.Н., Ахвердян Л.А., Оганесян Г.А. Пространственно-временные изменения электромагнитной индукции в земной коре и верхней мантии на территории Армении // Труды научной конференции, посвященной 10-летию Спитакского землетрясения, по проблемам изучения землетрясений, Ереван, 27–28 октября 1998 г. Спец. выпуск. Ереван: Изв. Науки о Земле НАН РА, 1999. № 4. С.28–29.
- Григорян А.Г., Сковородкин Ю.П. Магнитовариационный мониторинг на территории Армении за 1986–1988 гг. // Научно-практическая конференция "Опыт комплексного изучения геофизических полей для целей сейсмопрогноза" 13–15 мая 1998 г. М.: Геоинформмарк, 1998. С.39–40.
- Григорян А.Г., Сковородкин Ю.П., Ахвердян Л.А. Изучение геомагнитных предвестников сильных землетрясений // Изв. Науки о Земле НАН РА (Ереван, 27–28 октября 1998 г.). Спец. вып. 1999. № 4. С.35–37.
- Гуфельд И.Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3, № 4. С.417–435.
- Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. 189 с.
- *Канониди К.Х., Канониди Х.Д., Петров В.Г.* Развитие сети геомагнитных наблюдений // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли: Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75. 2015. С.77–87.
- Киссин И.Г. О влиянии флюидных систем консолидированной коры на дегазацию Земли и образовании нефти // Доклады Академии наук. 2011. Т. 440, № 1. С.72–76.
- *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 328 с.
- Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б. Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С.28–32.
- Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Лиходеев Д.В., Заклюковская А.С., Преснов Д.А. Развитие системы разномасштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 4. С.47–57.
- Назаретян С.Н., Дургарян Р.Р., Мирзоян Л.Б., Григорян А.Г., Шахбекян Т.А. Региональные разломы территории Армении по геофизическим данным и их сейсмичность. Ереван: Изд-во "Гитутюн" НАН РА, 2015. 184 с.
- *Нечаев Ю.В.* Линеаменты и тектоническая раздробленность: Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы / Под ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН, 2010. 215 с.
- Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М., Рокитянская Д.А. Аномалии геомагнитных вариаций на северо-западе Европейской части СССР // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 11. С.101–105.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. 2021. Том 22. № 3

- *Сковородкин Ю.П.* Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. М.: ИФЗ АН СССР, 1985. 197 с.
- Сковородкин Ю.П., Григорян А.Г. Магнитовариационный мониторинг на территории Армении за 1986–1988 годы // Научно-практическая конференция "Опыт комплексного изучения геофизических полей для целей сейсмопрогноза", 13–15 мая 1998 г. М.: Геоинформмарк, 1998. 39 с.
- Сковородкин Ю.П., Гусева Т.В., Безуглая Л.С., Тоноян Е.П. Исследование геомагнитных вариаций с целью изучения геодинамики и глубинного геологического строения в сейсмоопасных зонах Таджикской ССР. М.: ИФЗ АН СССР, 1985. 60 с.
- Сковородкин Ю.П., Тоноян Е.П. Временные изменения электромагнитной индукции на прогностических полигонах // Сейсмический мониторинг земной коры. М.: ИФЗ АН СССР, 1986. С.199–203.
- Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. М.: ИФЗ РАН, 2013. 288 с.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 344 с.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Т. І. Л.: ЛГУ, 1964. 445 с.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: ЛГУ, 1978. 482 с.
- *Grigorian A.G., Skovopodkin Y.P., Nazaretian S.N.* Local geomagnetic field changes and seismicity of Armenia for 1981–1993 // Proceedings Third International Conference on seismology and earthquake engineering. Section 3. May 17–19, 1999. V. I. P.229–234.
- *Yamazaki Y., Rikitake T.* Local anomalous changes in the geomagnetic field at Matsushire // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1970. V. 48. P.637–643.

Сведения об авторах

ГРИГОРЯН Алина Гришаевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел: +7(499) 254-87-35. E-mail: ag-grig@ifz.ru.

ЛИХОДЕЕВ Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел: + 7(499) 254-90-80. E-mail: dmitry@ifz.ru.

ON THE PROBLEM OF IDENTIFICATION OF POSSIBLE PRECURSORS OF STRONG SEISMIC EVENTS IN LOCAL VARIATIONS OF COMPONENTS OF THE VECTOR OF THE GEOMAGNETIC FIELD

A.G. Grigoryan, D.V. Likhodeev

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia Corresponding author: A.G. Grigoryan (e-mail: ag-grig@ifz.ru)

Abstract. Variations in the geomagnetic field (solar-diurnal, bay-like, etc.) caused by external sources, such as ionospheric currents in the *E* layer, currents flowing in the upper atmosphere, contain important information about geodynamic processes in the earth's crust. In order to estimate the change in the geological environment, the parameter N(A) was used – the ratio of the amplitudes of intensity variations of the geomagnetic field caused by an external source and measured synchronously at different stations. The calculated parameter N(A) makes it possible to estimate the spatial and temporal changes in the local response of the geomagnetic field as well as changes in electrical conductivity, to identify zones of most active development of the geodynamic process,

22

and so to determine the areas of preparation of the foci of large earthquakes. It is shown that for the system of selected observation points in the Republic of Armenia, the changes in the parameter N(A) are mainly caused by the induced component of the geomagnetic field. Using bay-like variations with periods of 10–25, 25–60, 60–90 min as well as Sq variations for 1986–1993, anomalous changes in the local geomagnetic field were detected, reflecting the activation of various geodynamic processes at different depths of the earth's crust and upper mantle within the studied territory of the Republic of Armenia. The precursors of two strong earthquakes – the Paravan earthquake (M=5.3, 13.05.1986) and Spitak earthquake (M=7.0, 07.12.1988) were revealed. The method was also applied in the area of the Elbrus volcanic center at the Baksan and Kuban observation points. Bay-like variations with periods of 10–25, 25–60 min and Sq variations were studied for the period 2011–2013. Small values of the anomalies in the N(A) parameter indicate insignificant changes in the electromagnetic parameters in the area of observation points, which indicates weak variations in the fluid regime of the geological environment in the Elbrus volcano area and is confirmed by the data of other observations. Studies of local changes in the parameter N(A) make it possible to control the processes in the geological environment associated with the stressstrain state and dynamics of the fluid regime. This is important for the search of precursors of earthquakes and volcanic eruptions.

Keywords: Earth's magnetic field, anomalous variations of the geomagnetic field, geodynamic processes, preparation of large seismic events, deep fluid-dynamic systems, regional seismicity.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation to support leading scientific schools No. HIII-5545.2018.5.

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Bezuglaya L.S., Prokhorov A.A., Skovorodkin Yu.P., Tonoyan E.P., The Use of Sq Variations for Studying the Seismotectonic Process, *Dokl. Akad. Nauk Arm. SSR* (Dokl. AN Arm. SSR), vol. 82, no. 1, pp. 33-37. [In Russian].
- Dobrovolskii I.P., *Mehanika podgotovki zemletriaseniia* (Tectonic earthquake preparation mechanics), Moscow: IFZ AN SSSR, 1984, 189 p. [In Russian].
- Gabrielian A.A., Sarkisian O.A., Simonian G.P., *Seismotektonika Armianskoi SSR* (Seismotectonics of the Armian SSR), Erevan: Erevanskii` Universitet, 1981, 284 p. [In Russian].
- Gabsatarova I.P., Borisov P.A., The modern consolidated catalog of earthquakes in the Caucasus: problems of creation and ways of improvement, in *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* (Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the XII International Seismological School), 2017. pp. 105-109. [In Russian].
- Grigorian A.G., Abnormal changes in electromagnetic induction as a harbinger of strong earthquakes, in *Geofizika XXI stoletiya: Sbornik trudov Sed'mykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo* (Geophysics of the XXI century: Proceedings of the Seventh Geophysical Readings named after V.V. Fedynsky), Moscow: OOO "Izd-vo GERS", 2005, pp. 198-205. [In Russian].
- Grigorian A.G., Local geomagnetic field variations of external origin: A case study of Armenia, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2007, vol. 43, no. 6, pp. 88-95.
- Grigorian A.G., Nazaretyan S.N., Akhverdyan L.A., Oganesyan G.A., Spatiotemporal Variations in Electromagnetic Induction in the Crust and Upper Mantle of Armenia, in *Trudy nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 10-letiyu Spitakskogo zemletryaseniya, po problemam izucheniya zemletryasenii, Erevan, 27–28 oktyabrya 1998 g. Spets. Vypusk* (Proceedings of the scientific conference dedicated to the 10th anniversary of the Spitak earthquake, on the problems of studying earthquakes, Yerevan, October 27-28, 1998 Special. Release), Yerevan: Izv. Nauki o Zemle NAN RA, 1999, vol. 4, pp. 28-29. [In Russian].

- Grigorian A.G., Skovorodkin Yu.P., Magnetic Variation Monitoring in Armenia over the 1986–1988 Period, in Nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Opyt kompleksnogo izucheniya geofizicheskikh polei dlya tselei seismoprognoza" 13–15 maya 1998 g. (Conf. Sci. Appl. Problems "Experience of Integrated Studies of Geophysical Fields in Relation to Seismic Prediction". May 13–15, 1998), Moscow: Geoinformmark, 1998, pp. 39-40. [In Russian].
- Grigorian A.G., Skovorodkin Yu.P., Akhverdian L.A., Study of geomagnetic precursors of strong earthquakes, *Izv. Nauki o Zemle NAN RA (Erevan, 27-28 oktyabrya 1998 g.). Spets. vyp.* (Izv. Earth Sciences NAS RA (Yerevan, October 27-28, 1998). Special. Release), 1999, no. 4, pp. 35-37. [In Russian].
- Grigorian A.G., Skovorodkin Yu.P., Nazaretian S.N., Local geomagnetic field changes and seismicity of Armenia for 1981–1993, in *Proceedings Third International Conference on seismology and earthquake engineering, Section 3, May 17–19, 1999*, 1999, vol. I, pp. 229-234.
- Gufeld I.L., Geological consequences of amorphization of the structure of the lithosphere and upper mantle caused by hydrogen degassing, *Geodinamika i tektonofizika* (Geodynamics and Tectonophysics), 2012, vol. 3, no. 4, pp. 417-435. [In Russian].
- Kanonidi K.Kh., Kanonidi Kh.D., Petrov V.G., Development of a geomagnetic observation network, in *Elektro-magnitnye i plazmennye protsessy ot nedr Solntsa do nedr Zemli. Yubileinyi sbornik IZMIRAN-75* (Electromagnetic and plasma processes from the interior of the Sun to the interior of the Earth. Jubilee collection IZMIRAN-75), 2015, pp. 77-87. [In Russian].
- Kissin I.G., *Flyuidy v zemnoi kore: Geofizicheskie i tektonicheskie aspekty* (Fluids in the Earth's Crust: Geophysical and Tectonic Aspects), Moscow: Nauka, 2015, 328 p. [In Russian].
- Kissin I.G., Influence of fluid systems of the consolidated crust on degassing of the earth and oil formation, *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 440, no. 1, pp. 1202-1206.
- Likhodeev D.V., Dudarov Z.I., Zhostkov R.A., Presnov D.A., Dolov S.M., Danilov K.B., Studying the Deep Structure of Elbrus Volcano by Microseismic Sounding, *Journal of Volcanology and Seismology*, 2017, vol. 11, no. 6, pp. 413-418.
- Malovichko A.A., Gabsatarova I.P., Likhodeev D.V., Zaklyukovskaya A.S., Presnov D.A., Development of Multiscale Seismic Monitoring System in the Elbrus Volcano Region, *Seismic Instruments*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 259-266.
- Nazaretiaan S.N., Durgarian R.R., Mirzoian L.B., Grigorian A.G., Shakhbekian T.A., Regional'nye razlomy territorii Armenii po geofizicheskim dannym i ikh seismichnost' (Regional faults of the territory of Armenia according to geophysical data and their seismicity), Erevan: Izd-vo "Gitutyun" NAN RA, 2015, 184 p. [In Russian].
- Nechaev Yu.V., *Lineamenty i tektonicheskaya razdroblennost': Distantsionnoe izuchenie vnutrennego stroeniya litosfery* (Lineaments and tectonic fragmentation: Distance learning of the internal structure of the lithosphere), Moscow: IFZ RAN, 2010, 215 p. [In Russian].
- Rokitianskii I.I., Kulik S.N., Logvinov I.M., Rokitianskaia D.A., Anomalies of geomagnetic variations in the northwest of the European part of the USSR, *Izvestiya AN SSSR* (Izvestia Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth), 1982, no. 11, pp. 101-105. [In Russian].
- Skovorodkin Yu.P., *Izuchenie tektonicheskikh protsessov metodami magnitometrii* (Study of tectonic processes using magnetometry methods), Moscow: IFZ AN SSSR, 1985, 197 p. [In Russian].
- Skovorodkin Yu.P., Grigoryan A.G., Magnetic variation monitoring in the territory of Armenia for 1986-1988, in *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Opyt kompleksnogo izucheniya geofizicheskikh polei dlya tselei seismoprognoza"*, 13–15 maya 1998 g. (Scientific-practical conference "Experience in the complex study of geophysical fields for seismic forecasting", May 13-15, 1998), Moscow: Geoinformmark, 1998, 39 p. [In Russian].
- Skovorodkin Yu.P., Tonoyan E.P., Temporary changes in electromagnetic induction at prognostic test sites, *Seismicheskii monitoring zemnoi kory* (Seismic monitoring of the earth's crust), Moscow: IFZ AN SSSR, 1986, pp. 199-203. [In Russian].
- Skovorodkin Yu.P., Guseva T.V., Bezuglaya L.S., Tonoyan E.P., *Issledovanie geomagnitnykh variatsii s tsel'yu izucheniya geodinamiki i glubinnogo geologicheskogo stroeniya v seismoopasnykh zonakh Tadzhikskoi SSR* (Study of Geomagnetic Variations in Relation to Geodynamics and Deep Geological Structure in Seismically Hazardous Zones of the Tajik SSR), Moscow: IFZ AN SSSR, 1985, 60 p. [In Russian].
- Sobisevich A.L., Izbrannye zadachi matematicheskoi geofiziki, vulkanologii i geoekologii. T. 2. Severokavkazskaya geofizicheskaya observatoriya. Sozdanie, analiz rezul'tatov nablyudenii (Selected Problems on Mathematical Geophysics, Volcanology, and Environmental Geology, vol. 2: North Caucasian Geophysical Observatory. Foundation, Analysis of Monitoring Results), Moscow: IFZ RAN, 2013, 288 p. [In Russian].
- Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Kanonidi K.Kh., Likhodeev D.V., Gravimagnetic Perturbations Preceding Earthquakes, *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 475, no. 2, pp. 891-894.

- Sobolev G.A., *Osnovy prognoza zemletryasenii* (Basics of earthquake prediction), Moscow: Nauka, 1993, 344 p. [In Russian].
- Vanyan L.L., Hindman R.D., On the Origin of Electrical Conductivity in the Consolidated Crust, *Izvestiya*. *Physics of the Solid Earth*, 1996, vol. 32, no. 4, pp. 266-271.
- Yamazaki Y., Rikitake T., Local anomalous chandes in the geomagnetic field at Matsushire, *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, 1970, vol. 48, p. 637-643.
- Yanovsky B.M., Zemnoi magnetism. Tom I (Terrestrial magnetism. Vol. I), Leningrad: LGU, 1964, 445 p. [In Russian].
- Yanovsky B.M., Zemnoi magnetizm (Terrestrial magnetism), Leningrad: LGU, 1978, 482 p. [In Russian].

About the authors

GRIGORYAN Alina Grishaevna – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: + 7(499) 254-87-35. E-mail: ag-grig@ifz.ru

LIKHODEEV Dmitry Vladimirovich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-90-80. E-mail: dmitry@ifz.ru