

УДК. 550.344.385

АНОМАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕЛИЯ, РАДОНА И ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ, КАК ВОЗМОЖНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ АРМЕНИИ

© 2025 г. А. Г. Григорян^{1,*}, А. А. Баранов^{2,**}¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия²Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

*E-mail: ag-grig@ifz.ru

**E-mail: aabaranov@gmail.com

С целью исследования процессов в геологической среде при подготовке сильных землетрясений в 1980–1993 гг. на территории Армении проводился мониторинг для разных геофизических полей (геомагнитное, гравитационное, геохимическое и радоновое). Изучение изменений переменного геомагнитного поля δT проводилось с помощью отношений амплитуд синхронно измеренных вариаций компонент δT поля в северной части Армении. Для оценки изменения состояния геологической среды был применен расчетный параметр $N(A) = A_i/A_j$, отношение амплитуд вариаций геомагнитного поля, вызываемых внешним источником и измеренных синхронно на разных парах станций. Расчетный параметр $N(A)$ характеризует изменение электромагнитной индукции (электропроводности) геологической среды. Перед Спитакским землетрясением значения параметра $N(A)$ уменьшились примерно на 35%. Анализ данных до Парванийского землетрясения также показывает резкий спад значений этого параметра на 20–25%. Изменения в расчетном параметре $N(A)$ показывают, что в изучаемой геологической среде изменилась электромагнитная индукция или электропроводность. Концентрация подпочвенного радона на станции Джермук перед Спитакским землетрясением увеличилась на 15%, а на станции Ленинакан, наоборот, уменьшилась. За несколько месяцев до Спитакского землетрясения в Каджаранской скважине появился мантийный гелий, который обычно появляется перед сильными землетрясениями. В северной части Армении, где проводились измерения силы тяжести, также перед Спитакским землетрясением были зафиксированы аномальные изменения. Полученные аномальные изменения в геофизических полях являются возможными геофизическими предвестниками Парванийского (13.05.1986 г., $M = 5.4$) и Спитакского (07.12.1988 г., $M = 7.0$) землетрясений.

Ключевые слова: аномальные вариации геомагнитного поля Земли, предвестники землетрясений, процессы в земной коре, подготовка крупных сейсмических событий, индукция, электропроводность, глубинные флюидо-динамические системы, радон, гелий.

Для цитирования: Григорян А.Г., Баранов А.А. Аномальные вариации геомагнитного поля, концентрации гелия, радона и гравитационного поля, как возможные предвестники сильных землетрясений на примере Армении // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 2. С. 28–40. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_2_28

Введение

Определение районов (приблизительное расположение эпицентра ожидаемого землетрясения) сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах, где расположены большие города и объекты особо важного назначения (АЭС, водохранилища и т.п.), остается одной из главных задач современной науки о землетрясениях. Развитие геодинамических процессов, которые сопровождаются изменением напряженного состояния земной коры и накоплением сейсмической энергии, проявляется в изменениях физических параметров различных геофизических полей, доступных нашему наблюдению.

Сейсмотектонический процесс, который рассматривается как изменение напряженно-деформированного состояния геологической среды, и способствующий возникновению различных неоднородностей в этой среде, является довольно сложным [Добровольский, 1984].

Неоднородность – это важнейшее свойство геофизической среды. Причиной возникновения неоднородностей, кроме изменения напряженно-деформированного состояния среды, является проникновение в эту среду вещества, как, например, газов, флюидов и т.д. Неоднородности, возникшие в геологической среде, отражаются в естественных полях, в частности в геомагнитном поле и вызывают вариации определенного типа [Безуглая и др., 1986].

Поиском предвестников сильных землетрясений человечество занимается давно. Более современные теории прогноза землетрясений опираются на детальный анализ различных физических полей Земли, таких как изменение полей напряжений при морских и земных приливах [Chen et al., 2012; Cochran et al., 2004; Tanaka, 2010; Баранов и др., 2019], изменение вариаций электрического и геомагнитного полей Земли [Nattori, 2004; Гульельми, Зотов, 2012; Зотов и др., 2013; Собисевич и др., 2013; Собисевич и др., 2017; Григорян, Лиходеев, 2021]. Несмотря на некоторые успехи в этих областях, прогноза землетрясений по-прежнему не существует [Соболев, 1983; Соболев, Пономарев, 2003].

Метод

Геомагнитное поле

Одним из перспективных методов для выявления предвестников сильных сейсмических событий является анализ вариаций переменного геомагнитного поля.

Переменную часть геомагнитного поля в основном создают внешние источники, например, ионосферные токи в слое E, солнечные корпускулярные потоки. Вариации переменного геомагнитного поля δT (солнечно-суточные, бухтообразные и др.), вызываемые внешними источниками, содержат в себе важную информацию о геодинамических процессах в земной коре [Сковородкин, 1986, Григорян, Лиходеев, 2021]. Хотя природа геомагнитных вариаций не всегда очевидна, но, используя их можно выявить пространственно-временные изменения электромагнитной индукции в земной коре, что и является своеобразным признаком об изменениях физических параметров геологической среды.

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; Ваньян, Хайдман, 1996; Григорян, 2007]. Изменение амплитудно-частотного состава вариаций магнитного поля происходит как за счет флуктуации внешнего источника, так и в связи с изменением 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].

В работе исследовались солнечно-суточные Sq вариации и бухтообразные вариации. Мы изучали активную часть солнечно-суточных Sq вариаций, которые появляются с утра: с восходом солнца и заканчиваются с его закатом. Период этих вариаций длится от 6 до 10 часов. Бухтообразные вариации D_0 образуются за счет ионосферных токов, от их силы и протяженности зависит форма бухты. Они хорошо выделяются в средних широтах Земли, особенно на компонентах δH и δZ переменного геомагнитного поля [Яновский, 1978].

В настоящей работе, используя все записи трех магнитовариационных станций на территории Армении, была разработана и апробирована методика для оценки изменений локального геомагнитного поля внешнего происхождения (переменного магнитного поля) на разных глубинах земной коры и верхней мантии. Были проанализированы полученные данные трех магнитовариационных станций за

период 1986–1993 гг. Показано, что выявленные аномальные изменения в локальном геомагнитном поле вызваны изменением электромагнитной индукции или электропроводности в районе исследований и могут использоваться как возможные предвестники сильных ($M \geq 5$) землетрясений.

На примере Спитакского и Парванийского землетрясений рассматриваются аномальные изменения переменного геомагнитного поля δT . Как уже сказано выше, величина переменного геомагнитного поля δT незначительна по сравнению с величиной постоянного поля Земли, тем не менее, его изучение представляет большой научный интерес.

Электромагнитная индукция, создаваемая в Земле Sq и бухтообразными вариациями, характеризует состояние среды, поскольку величина локального магнитного отклика среды на внешние изменения зависит от электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемостей, составляющих его структур [Сковородкин, Тоноян, 1986; Ваньян, Хайдман, 1996]. Период вариаций является важнейшей характеристикой во всех задачах электромагнитного зондирования, так как этот параметр определяет глубину проникновения вариаций.

Расчёты показывают, что глубина проникновения поля вариаций составляет [Безуглая и др., 1986]:

- а) для Sq вариаций до 280 км;
- б) для вариаций с периодом 5–25 мин – 2–8 км;
- в) для вариаций с периодом 30–60 мин – 10–20 км.

Солнечно-суточные вариации (Sq)

Различаются два типа солнечно-суточных вариаций: спокойные (Sq) и возмущенные (Sd). Токовая система, создающая Sq вариации, состоит из северного и южного вихрей, центры которых расположены вблизи полуденного меридиана на геомагнитной широте порядка 30° с. ш. [Ротанова, Пушков, 1982]. Сила и направление индуцированных токов зависят от освещения солнцем земной атмосферы. Суточный ход Sq вариаций на разных широтах северного и южного полушарий разный. Они зависят от географической широты, местного времени, сезона года, 11-летнего цикла солнечной активности и от уровня солнечной активности [Безуглая и др., 1986; Сковородкин и др., 1986; Яновский, 1978].

Бухтообразные вариации

Бухтообразные вариации вызываются особенной системой электрических токов в ионосфере. При усилении ионосферных токов, текущих вдоль зоны полярных сияний, в интервале геомагнитных широт 65° – 70° , образуется полярный электроджет, длина которого достигает 2–3 тыс км. Эти суббури проявляются в виде бухтообразных вариаций (D_e) поля. Продолжительность (D_e) колеблется от нескольких минут до 2–3 часов.

Район исследований

Исследуемая территория Армении характеризуется осложненным геологическим, тектоническим строением и испытывает дифференциальный характер поднятия и горообразования. Районы повышенной сейсмической активности характеризуются наличием сильномагнитных кристаллических пород, разнообразием структуры электротеллурических полей [Габриэлян, 1971; Саргсян и др., 2021]. В районе выполнения исследований за период с 1986 по 1993 гг. было только два землетрясения с $M > 5$: Парванийское (13.05.1986 г., $M = 5.4$) и Спитакское (07.12.1988 г., $M = 7.0$) (рис. 1).

Разломы северо-западной ориентировки, особенно Памбак–Севанский, который считается восточным продолжением Северо-Анатолийского глубинного разлома, и Базумо–Севанский контролируют сейсмичность и играют основную роль в формировании геолого-структурных особенностей западной части исследуемой территории. В центральной части исследуемой территории проходят Северо-Анатолийский и Гарнийский глубинные разломы [Karakhanian et al., 2004]. Эта часть Армении также является одним из сейсмоактивных районов [Бурмин и др., 2016]. Менее активным, с сейсмической точки зрения, является зона, где расположена станция Товуз [Бурмин и др., 2013; 2018].

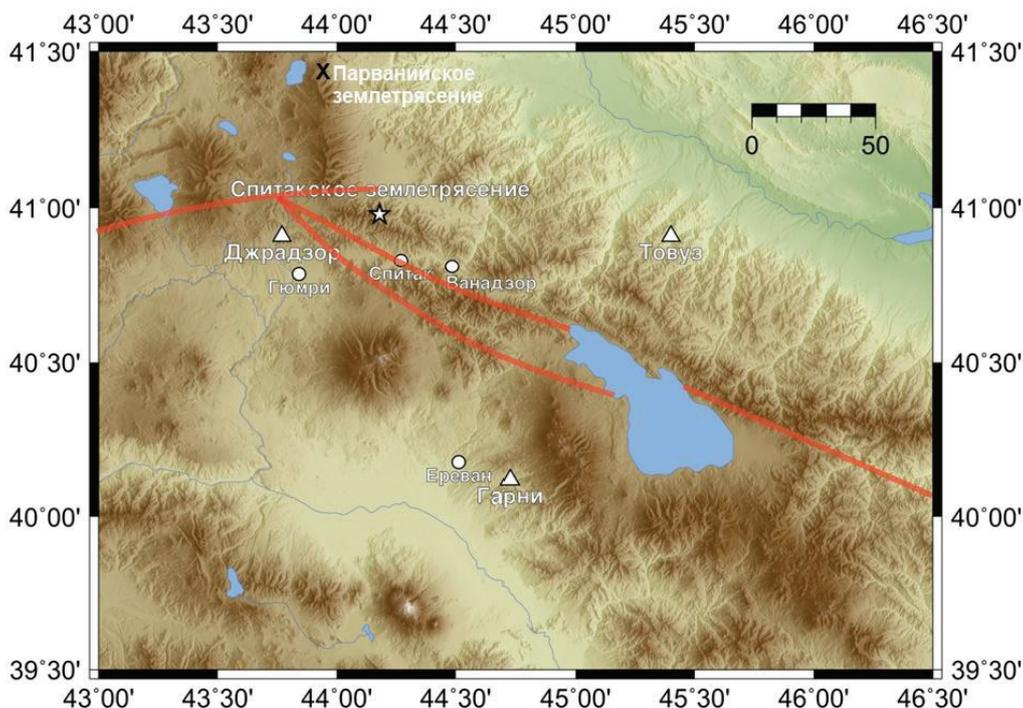


Рис. 1. Расположение магнитовариационных станций на территории Республики Армения. Кружками обозначены крупные населенные пункты; треугольниками – магнитовариационные станции; красными линиями показаны разломы; звездочкой – эпицентр Спитакского землетрясения; символом X показан эпицентр Парванийского землетрясения

Также важно было учитывать расположение исследуемого региона, поскольку метод применяется в средних широтах Земли, где вариации переменного геомагнитного поля хорошо выделяются. На рис. 1 показан рельеф исследуемого региона с нанесенными глубинными разломами и станциями магнитовариационного мониторинга. Исходя из вышеуказанного, выбранная территория является весьма перспективной для изучения пространственно-временных изменений естественного переменного магнитного поля с методом магнитометрии.

С целью изучения геодинамического процесса в разломно-блоковых структурах с помощью магнитометрии, профессором Ю. П. Сковородкиным в 1986 г. в Армении был организован магнитовариационный мониторинг. Была создана сеть станций геомагнитных наблюдений (рис. 1). В районах населенных пунктов Джрадзор, Товуз и Гарни были установлены трехкомпонентные аналоговые магнитовариационные станции системы Боброва МВС-3, которые обеспечили круглосуточные наблюдения за компонентами вектора переменного геомагнитного поля δT . Разрешение аппаратуры составляло 0.5–0.8 нТл. Были изучены материалы (записи на фотолентах), полученные на трех магнитовариационных станциях за 1986–1993 гг. Для изучения геодинамического процесса более сейсмоактивной северной части Армении был применен расчетный параметр $N(A)$, предложенный профессором Ю. П. Сковородкиным. Расчетный параметр $N(A)$ является отношением амплитуд вариаций геомагнитного поля внешнего происхождения, измеренных синхронно на разных парах станций:

$$N(A) = A_i/A_j, \quad (1)$$

где A_i и A_j – амплитуды вариаций компонент геомагнитного поля $T\delta$ в i и j пунктах наблюдения. Расчетный параметр $N(A)$ характеризует изменение электромагнитной индукции или электропроводности геологической среды [Сковородкин, 1985; Григорян, 2007].

Рассматривается изменение параметра $N(A)$ за весь период наблюдения. Если отношение амплитуд несколько месяцев ближе к единице, это указывает на то, что поле спокойное и аномалий нет.

В нашем случае между станциями Джрадзор и Товуз расчетный параметр для Sq вариаций изменился до 0.53 единиц, т.е. изменение электропроводности или электромагнитной индукции достигло 35%. Расчеты показали, что пространственно-временная структура поля Sq и бухтообразных вариаций для уровня магнитной активности $K_p \leq 4$ для изучаемого района однородна, а изменения параметра $N(A)$, главным образом, вызваны внутренним источником [Григорян, 2007]. Используемые нами периоды геомагнитных вариаций достаточно велики, что позволяет в дальнейшем пренебречь токами смещения. Для получения более детальной информации об изменении электромагнитной индукции на разных горизонтах земной коры, помимо вариаций Sq , нами были изучены также бухтообразные вариации (D_6) разных периодов компонент δZ , δH и δD . Были изучены вариации с периодами 5–25 и 25–60 мин.

Методика расчета параметров

1. Выбор вариаций определенного типа и периода, измерение синхронно на разных станциях, для компонент δZ , δH и δD , из магнитограмм.
2. Группирование выбранных вариаций определенными периодами:
 - а) 2–25 мин, б) 30–60 мин, в) 5–10 часов (Sq вариации).
3. Определение амплитуд выбранных вариаций, которые проводились по формулам:

$$A_{\delta H} = (\delta H_{\max 1} + \delta H_{\max 2} - 2\delta H_{\min})/2, \quad (2)$$

$$A_{\delta Z} = (\delta Z_{\max 1} + \delta Z_{\max 2} - 2\delta Z_{\min})/2, \quad (3)$$

где $\delta H_{\max 1}$, $\delta H_{\max 2}$ и δH_{\min} – экстремальные значения выбранных вариаций в миллиметрах.

4. Полученные в миллиметрах амплитуды далее переводились в нТл.
5. Применяя формулу (1), массив полученных данных был использован для определения среднемесячных значений параметра $N(A)$.

При обработке оказалось, что отношение амплитуд вариаций с положительным или отрицательным знаком имеют одни и те же величины.

Среднемесячные значения параметра определяются формулой:

$$N(A)_{i,j} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m N_k(A)_{i,j}, \quad (4)$$

где m – число случаев в месяце Sq вариаций в спокойные дни или бухтообразных вариаций.

6. Построение временных рядов с использованием среднемесячных значений $N(A)$ для всех пар станций. Были изучены все материалы, полученные за временной интервал 1986–1993 гг.

Результаты

Анализируя полученные результаты можно заметить, что за время наблюдений 1986–1989 гг. (рис. 2) происходили разноприродные флуктуации параметра $N(A)$, превышающие возможные инструментальные ошибки и другие эффекты. Максимальные изменения параметра $N(A)$ достигают 0.54 (~ 35%) между парами станций Джрадзор – Товуз [$N_1(A)_z$] (рис. 2). Изменения между парами станций Джрадзор – Гарни [$N_2(A)_z$] за данный период составляет не более 0.1, а между парами станций Товуз – Гарни [$N_3(A)_z$] они были в пределах ошибок. Это позволяет считать, что источник выявленных аномальных вариаций параметра $N(A)$ находится в области расположения станции Джрадзор (рис. 1).

После Парванийского землетрясения значение расчетного параметра $N(A)_z$ между всеми станциями стабилизировалось. Начиная с середины 1987 г. вновь отслеживаются аномальные изменения параметра $N(A)_z$. Далее вплоть до Спитакского землетрясения наблюдается монотонное уменьшение параметра $N(A)_z$ до 0.54, с учетом ошибок обработки.

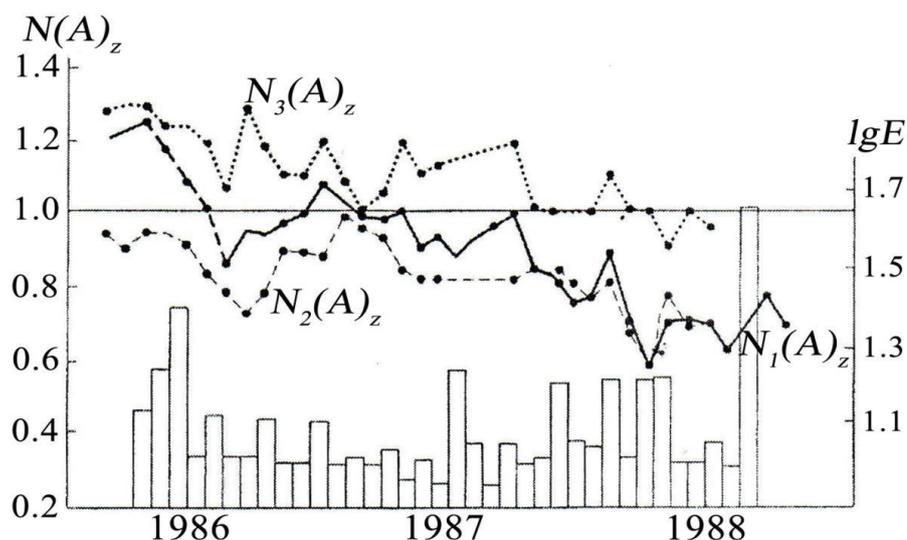


Рис. 2. Изменение среднемесячных значений параметра $N(A)$ для Sq вариаций компоненты δZ между всеми станциями в соответствии с выделенной сейсмической энергией за период 1986–1988 гг. [Саргсян и др., 2021], Джрадзор – Товуз [$N_1(A)$], Джрадзор – Гарни [$N_2(A)$], Гарни – Товуз [$N_3(A)$]

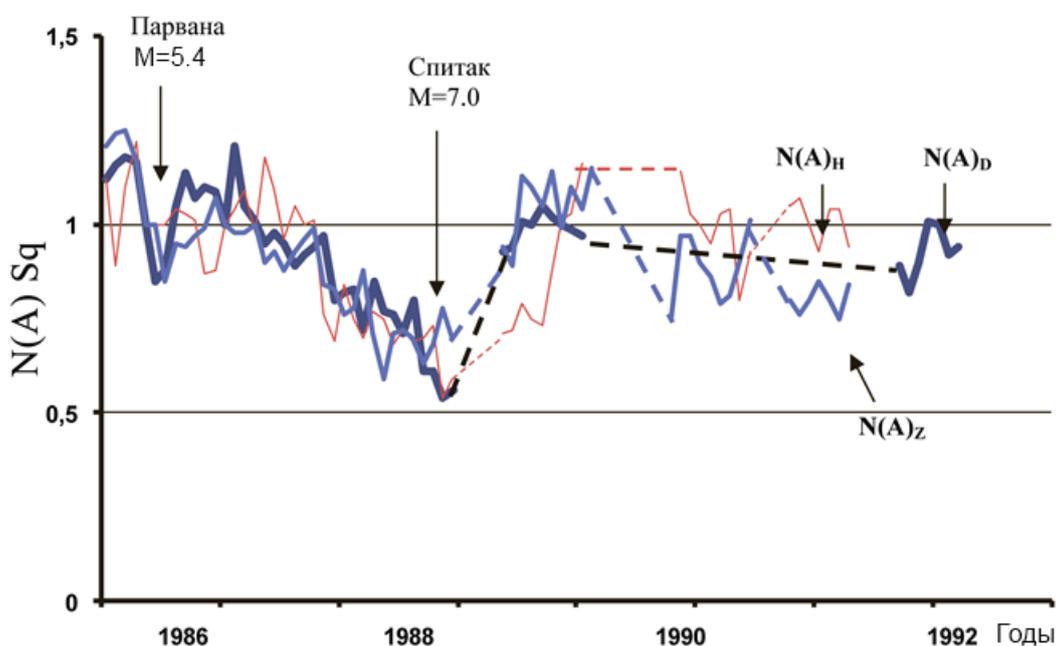


Рис. 3. Изменение среднемесячных значений параметра $N(A)$ Sq вариаций для компонентов δD , δH и δZ геомагнитного поля δT между станциями Джрадзор – Товуз за период 1986–1993 гг.

На рис. 3 показаны изменения среднемесячных значений параметра $N(A)$ для Sq вариаций компонентов δD , δH и δZ геомагнитного поля между станциями Джрадзор – Товуз за период 1986–1993 гг., где хорошо видно, что после Спитакского землетрясения параметр $N(A)$ почти возвращается к предыдущим значениям (рис. 3). Это говорит о том, что исследуемый процесс был обратимым.

Аналогичные результаты получены для вариаций с периодами (5–25 и 30–60 мин (рис. 4). Поэтому можно предположить, что аномальные изменения локального геомагнитного поля внешнего происхождения связаны с подготовкой двух землетрясений исследуемого района с $M = 5.4$ и 7.0 . На рис. 4 показаны изменения параметра $N(A)$ для бухтообразных вариаций с периодами 30–60 и 5–25 мин, компонентов δH и δZ переменного геомагнитного поля δT , между станциями Джрадзор – Товуз. Из полученных результатов, которые представлены на рисунках 2–4, также можно определить, что аномальные изменения расчетного параметра $N(A)$ коррелируют с Парванийским (13.05.1986 г., $M = 5.4$) и Спитакским (07.12.1988 г., $M = 7.0$) землетрясениями.

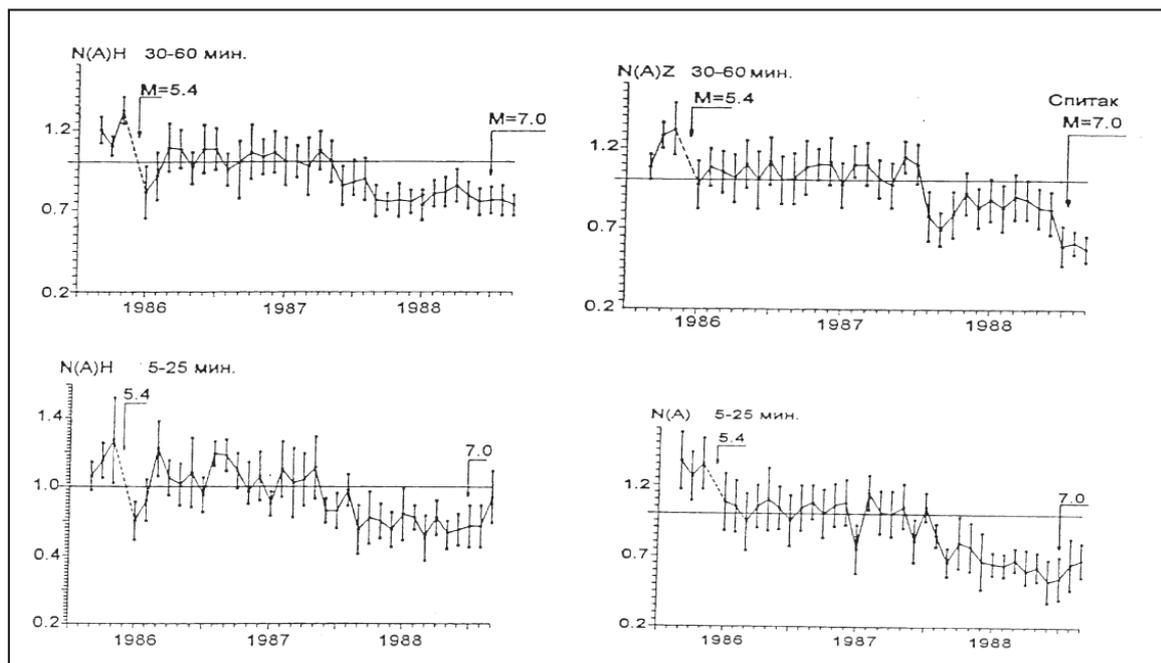


Рис. 4. Изменение среднемесячных значений параметра $N(A)$ для бухтообразных вариаций с периодами 5–25 и 30–60 мин для горизонтальной и вертикальной составляющих геомагнитного поля между станциями Джрацзор – Товуз за период 1986–1988 гг. Вертикальными отрезками изображены отклонения данных от среднемесячных значений, взятых отдельно для каждого месяца

Геохимические исследования

Метод геохимического мониторинга земной коры разработан в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН [Киссин, 1996]. Он основан на способности подземных вод и других флюидов реагировать на изменения напряженно-деформированного состояния земной коры. Метод геохимического мониторинга земной коры позволяет выявлять процессы, связанные с землетрясениями.

В Армении, задолго до Спитакского землетрясения, в городах Ленинакан и Джермук был организован мониторинг радонового поля [Басенцян, Рудаков, 1989]. В г. Ленинакане из-за Спитакского землетрясения регистрация радона была приостановлена и возобновлена лишь через неделю. На рис. 5 показаны измеренные изменения концентрации почвенного радона на станциях Ленинакан (рис. 5а) и Джермук (рис. 5б), энергетический класс сейсмических событий показан на рис. 5в. Оперативный предвестник в поле почвенного радона на станциях Джермук и Ленинакан проявился непосредственно в день землетрясения (в ночное время измерения на станциях не велись), и выразился на станции Джермук в увеличении концентрации радона на 15% относительно сезонной составляющей эманационного поля (рис. 5б). А на станции Ленинакан в день землетрясения утром успели провести всего 3 замера, которые показали, что выделение газа идет на спад.

После возобновления регистрации было зафиксировано дальнейшее уменьшение значений и постепенное возвращение на прежний уровень (рис. 5а). Такое поведение эманационного поля объясняется активизацией геодинамического процесса в земной коре, скорее всего передвижением плит, растяжением или сжатием геологической среды и т.д.

С 1979 г. Институтом геохимии Армянской ССР в населенных пунктах Каджаран, Арарат, Суренаван, Ахурик, Карчахпюр, Цовагюх была создана сеть скважин режимных геохимических наблюдений (рис. 6). Наблюдения сопровождалась метрологическими работами на всех стадиях [Игумнов, Степанян, 1989]. На рис. 6 показана схема расположения различных скважин для мониторинга гидрогеохимических и гидродинамических параметров: I – области с аномальными изменениями,

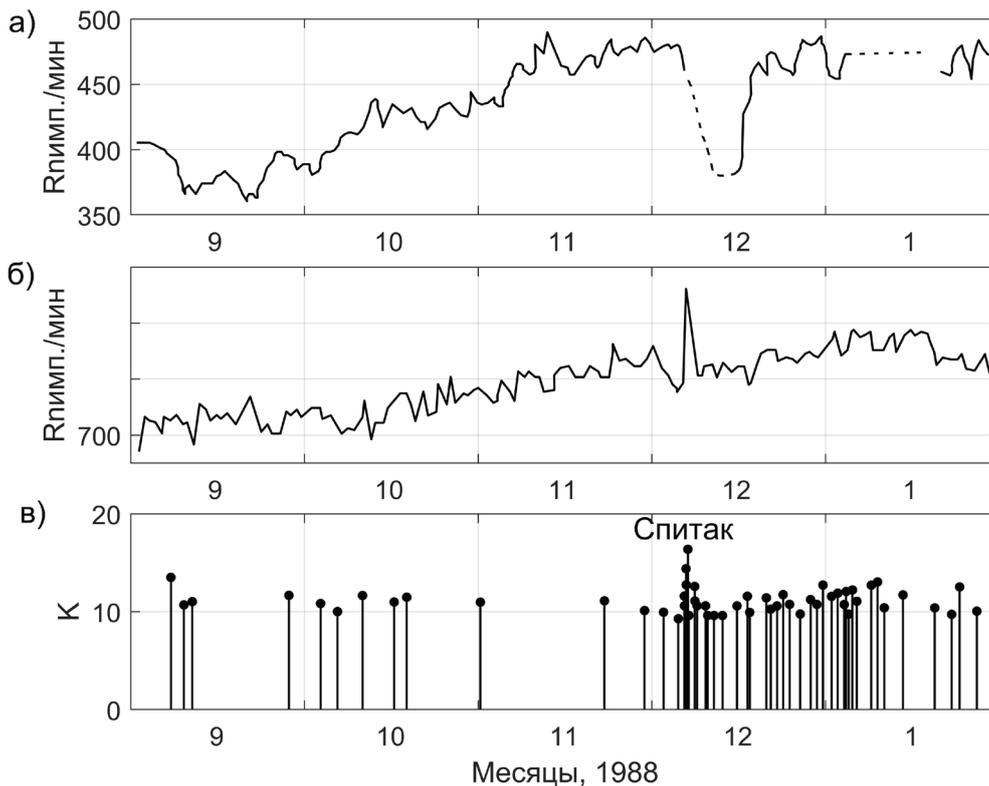


Рис. 5. Изменения концентрации почвенного радона (Rпимп./мин) на станциях Лениканан (а) и Джермук (б) [Басенцян, Рудаков, 1989]. Энергетический класс сейсмических событий (в)



Рис. 6. Схема исследованных скважин гидрогеохимических и гидродинамических параметров [Игумнов, Степанян, 1989]. I – области с аномальными изменениями, выходящими за пределы различных вариаций; II – области со слабыми изменениями; 1, 2, 3 – номера исследованных скважин.

выходящими за пределы различных вариаций, II – области со слабыми изменениями (цифрами показаны номера скважин). Все наблюдательные скважины были расположены в зонах различных активных разломов. Такое расположение скважин позволило вести наблюдения за геохимической реакцией на землетрясения не только на территории Армении, но и на территориях Турции, Ирана, Грузии, Азербайджана.

С целью повышения частоты опроса, избавления от погрешностей отбора и хранения осуществлена автоматизация режимных наблюдений в пунктах Арарат, Каджаран, Армаш, где измерялся растворенный в воде гелий. Наблюдения велись с 1979 по 1989 гг. На рис. 7 показаны среднемесячные концентрации растворенного гелия в наблюдательных скважинах Армянской ССР. 1 скв. – Арарат, 2 скв. – Суренаван, 3 скв. – Каджаран. Землетрясения: Эрзурумское – 1983 г., $M = 7.0$; Ереванское – 1984 г., $M = 4.0$; Парванийское – 1986 г., $M = 5.4$; Спитакское – 1988 г., $M = 7.0$.

Режимные наблюдения за содержанием растворенного гелия с 1980 г. по 1989 гг. (рис. 7) установили устойчивое увеличение содержания гелия за этот период в Суренаванской скважине почти в 5 раз [Игумнов, Степанян, 1989]. Возможно, что подъем содержания гелия в Суренаване за такой период связан с относительным опусканием Араратской котловины на фоне относительного подъема соседнего Урцского блока. В то же время после каждого из землетрясений в скважине Каджаран наблюдалось резкое падение концентраций гелия (рис. 7). В скважине Арарат концентрация гелия менялась незначительно.

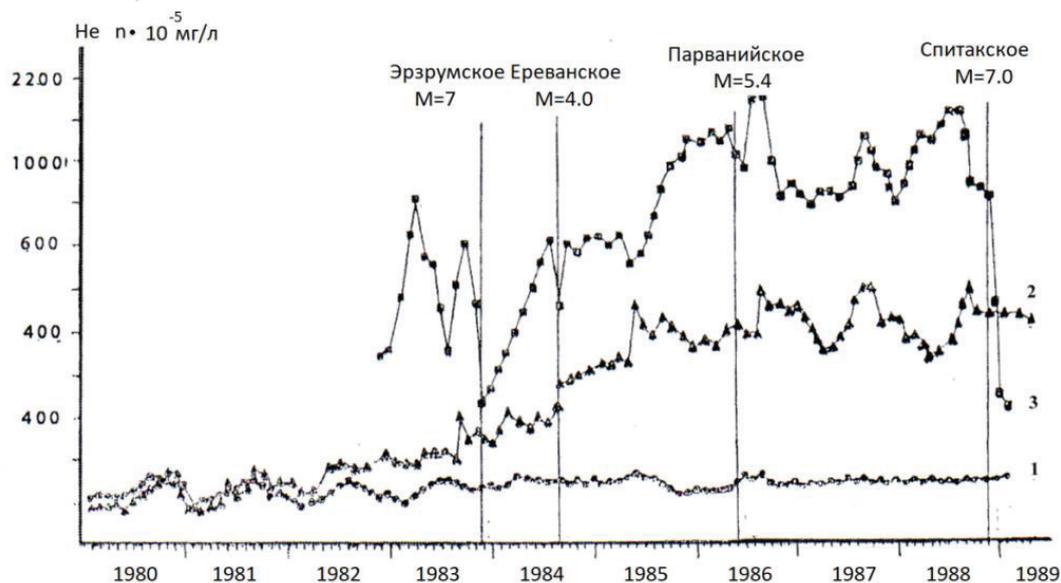


Рис. 7. Среднемесячные концентрации растворенного гелия в наблюдательных скважинах Армянской ССР [Игумнов, Степанян, 1989]. 1 скв. – Арарат, 2 скв. – Суренаван, 3 скв. – Каджаран. Землетрясения: Эрзурумское – 1983 г., $M = 7.0$; Ереванское – 1984 г., $M = 4.0$; Парванийское – 1986 г., $M = 5.4$; Спитакское – 1988 г., $M = 7.0$

Гравитационное поле

Поскольку основные изменения магнитных параметров связаны со станцией Джрадзор, то для анализа были использованы данные гравиметрических наблюдений по этому району. Материалы, которые охватывают период 1983–1990 гг., любезно предоставлены сотрудником ИГИС АН Армении А. О. Оганесяном. На рис. 8 показаны измерения силы тяжести по профилю Бавра – Исаакян в различные годы (1983, 1986, 1987, 1988, 1990 гг.). За базовый год в нижней части взят год наиболее ранний по отношению к году Спитакского землетрясения (1983 г.). За базовый год верхнего графика взят год самого землетрясения (1988 г.) [Оганесян и др., 1989]. Приведенные на рис. 8 графики отражают разность между базовым и измеренным значением при прохождении профиля за выбранные годы. Результаты гравитационных наблюдений для исследуемой территории Армении за данный период

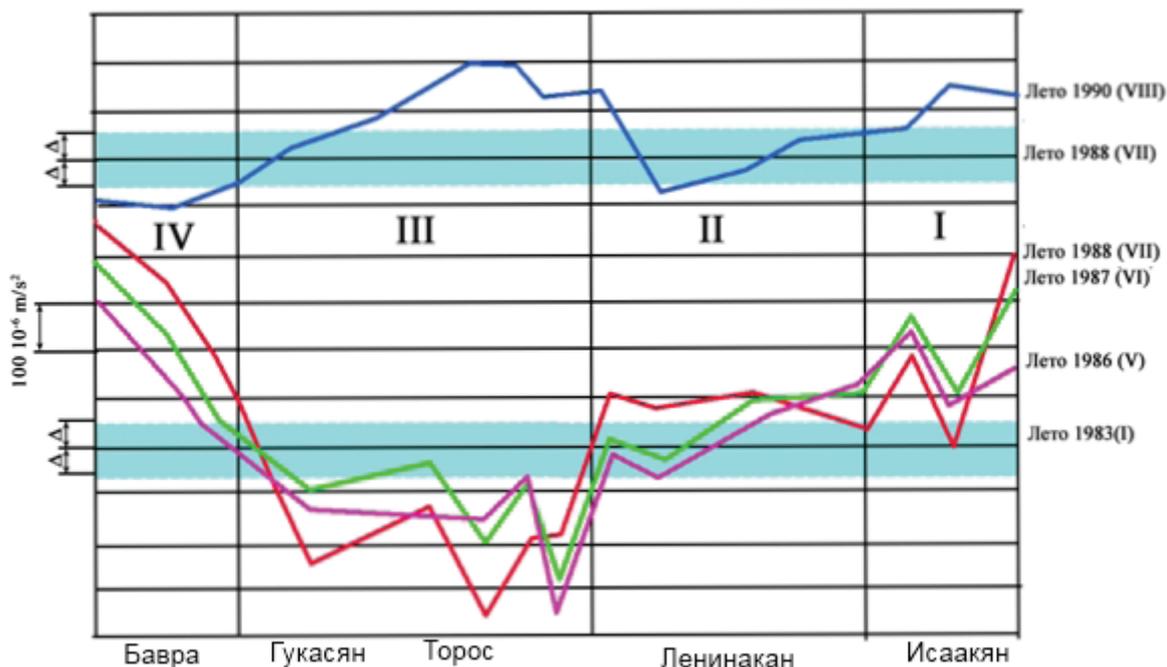


Рис. 8. Профиль измерения силы тяжести через Бавра – Исаакян в различные годы (1986, 1987, 1988, 1990 гг.)

показали, что в пределах активных разломов наблюдается нестабильный пульсационный характер изменения силы тяжести. Амплитуда изменений силы тяжести в этих зонах превышает $100 \times 10^{-8} \text{ м/с}^2$ в год, что в 3–5 раз выше по отношению к изменениям, наблюдаемым в районах развития стабильных блоков [Оганесян и др., 1989].

Обсуждение полученных результатов и Заключение

В работе были проанализированы вариации локального геомагнитного поля, концентрации гелия и радона в скважинах, силы тяжести перед сильными землетрясениями в Закавказье. Как уже отмечено выше, вариации геомагнитного поля, вызываемые внешними источниками, такими как солнечные потоки (Sq вариации), ионосферные токи (бухтообразные вариации), содержат в себе важную информацию о геодинамических процессах в земной коре.

Аномальные изменения параметра $N(A)$ являются оценкой состояния изучаемой геологической среды. Возникает вопрос, какие же процессы происходили в земной коре при подготовке Спитакского землетрясения, что привело к таким сильным изменениям в электромагнитной индукции (35%). Внимательно анализируя результаты (графики), полученные для северной части Армении, где с помощью параметра $N(A)$ оценены изменения электромагнитной индукции за 1986–1993 гг., авторы пришли к выводу, что до и после Спитакского события в среде происходили значительные изменения в физических свойствах. Эти быстрые изменения на разных глубинах начинаются в разное время. Сначала они возникают на глубине границы кора-мантия (Sq вариации), и только через несколько месяцев проявляются в верхних слоях Земли (бухтообразные вариации) (рисунки 2, 4). После достижения максимума, через короткое время, происходит землетрясение. Дальше, как мы видим на (рис. 3), среда в реальном времени медленно возвращается в почти прежнее состояние. Фактически эти значительные изменения в среде происходили в реальном времени, и они не являются следствием медленных тектонических движений. Полученные результаты позволяют определить регионы, где наиболее активно развивается геодинамический процесс, и происходит подготовка очагов крупных землетрясений (по рис. 2).

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы:

- а) процесс изменения физических свойств среды был обратимым;
- б) результаты мониторинга аномалий магнитного поля позволяют определить регионы, где можно ожидать сильные землетрясения;
- в) активизация геодинамического процесса начиналась снизу вверх (см. аномальные изменения в Sq вариациях);
- г) аномальные изменения магнитного поля не являются следствием медленных тектонических движений.

Что касается изменений геохимических параметров и гравитационного поля, то резкие скачки концентраций гелия и радона в скважинах также связаны с развитием геодинамического процесса при подготовке крупного землетрясения, что дает возможность использовать эти изменения как возможный краткосрочный предвестник (дни-часы).

Так, перед Спитакским землетрясением в районе эпицентра наблюдались локальные уменьшения силы тяжести. В доказательство развития процесса подготовки Спитакского землетрясения свидетельствует и факт появления мантийного гелия в Каджаранской скважине [Игумнов, Степанян, 1989]. Сравнивая полученные результаты по наблюдаемым физическим полям, можно отметить тот факт, что все аномалии коррелируют с сильным Спитакским землетрясением 1988 г.

Предполагается, что причинами изменений в физических свойствах геологической среды, в частности электропроводности, с большой вероятностью являются дегазация Земли и вертикальная фильтрация флюидов в верхних слоях земной коры [Киссин, 1996; Гуфельд, 2012; Григорян, Лиходеев, 2021]. Описываемый в настоящей работе мониторинг геофизических полей может быть использован для выявления возможных предвестников сильных землетрясений в сейсмоактивных регионах России: как Крым, Кавказ и Прибайкалье. В данной работе мы представили все имеющиеся материалы по Армении, которые связаны с Спитакским землетрясением, чтобы еще раз показать важность комплексного геофизического мониторинга в сейсмоактивных районах России и мира.

Финансирование

Работа частично выполнена в рамках гос. задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН и частично в рамках гос. задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (проект № АААА-А19-119011490131-3).

Благодарности

Авторы благодарят рецензентов, чьи важные замечания помогли значительно улучшить рукопись.

Список литературы

- Баранов А.А., Баранов С.В., Шебалин П.Н. Количественная оценка степени воздействия морских приливов на активность афтершоков в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2019. № 1. С. 67–72. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019167-72>
- Басенцян М.М., Рудаков В.П. Радоновый предвестник Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 года // Известия Академии Армянской ССР. Науки о Земле. 1989. Т. XLII. № 3. С. 64–66.
- Безуглая Л.С., Прохоров А.А., Сквородкин Ю.П., Тоноян Е.П. Использование Sq -вариаций для изучения сеймотектонического процесса // Доклады Академии наук Армянской ССР. 1986. Т. 82. № 1. С. 33–37.
- Бурмин В.Ю., Аветисян А.М., Сергеева Н.А., Казарян К.С. Некоторые закономерности проявления современной сейсмичности Кавказа // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. С. 11–17. <https://elibrary.ru/rzfjcv>
- Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б., Флейфель Л.Д., Аветисян А.М., Казарян К.С. Пространственное распределение коревых землетрясений Кавказа // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 1. С. 39–48. <https://elibrary.ru/vownbn>
- Бурмин В.Ю., Шемелева И.Б., Флейфель Л.Д., Аветисян А.М., Казарян К.С. Результаты обработки сейсмологических данных для территории Армении // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 1. С. 29–38.

- Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д. О природе электропроводности // Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.
- Габриэлян А.А. Геотектоническое районирование территории Армянской ССР // Известия Академии наук Армянской ССР. Науки о Земле. 1971. № 4. С. 3–21.
- Григорян А.Г., Лиходеев Д.В. К проблеме идентификации возможных предвестников сильных сейсмических событий в локальных вариациях компонент вектора геомагнитного поля // Геофизические исследования. 2021. Т. 22, № 3. С. 5–25. <https://doi.org/10.21455/gr2021.3-1>
- Григорян А.Г. Изменения локального геомагнитного поля внешнего происхождения на примере Армении // Физика Земли. 2007. № 6. С. 88–95. <https://elibrary.ru/ibankh>
- Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М. : ИФЗ АН СССР. 1984. – 189 с.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д. О магнитных возмущениях перед сильными землетрясениями // Физика Земли. 2012. № 2. С. 84–87. <https://elibrary.ru/oowgnf>
- Гуфельд И.Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // Геодинамика и Тектонофизика. 2012. Т. 3. № 4. С. 417–435. <https://elibrary.ru/pjsrwd>
- Зотов О.Д., Гульельми А.В., Собисевич А.Л. О магнитных предвестниках землетрясений // Физика Земли. 2013. № 6. С. 139–147. <https://doi.org/10.7868/S0002333713050141>
- Изумнов В.А., Степанян З.Г. Некоторые гидрогеохимические аспекты Спитакского землетрясения // Известия Академии наук Армянской ССР. Науки о Земле. 1989. Т. XL. № 3. С. 24–33.
- Киссин И.Г. Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1996. № 4. С. 30–40.
- Оганесян А.О., Оганесян С.М., Бабаджанян А.Г. О результатах проведённых исследований по неприливным изменениям силы тяжести на Ширакском геодинамическом полигоне: Международный симпозиум (Ереван, 2–6.10.1989). Тезисы докладов. Москва. 1989. С. 135–136.
- Ротанова Н.М., Пушков А.Н. Глубинная электропроводность Земли. М. : Наука. 1982. – 296 с.
- Саргсян Р.С., Казарян К.С., Бурмин В.Ю. Сейсмотектоника Армении: основные проблемы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 3. С. 616–633. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.310>
- Сковородкин Ю.П. Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. М. : ИФЗ АН СССР. 1985. – 197 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 Л.Е., Собисевич А.Л., Канониди К.Х. Результаты анализа инструментальных наблюдений аномальных геомагнитных возмущений, наведённых землетрясениями в геосферах. В сб.: Триггерные эффекты в геосистемах. М. : ГЕОС. 2013. С. 329–341. <https://elibrary.ru/twjnpv>
- Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Лиходеев Д.В. О гравимагнитных возмущениях, предвещающих сейсмические события // Доклады РАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 444–447.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М. : Наука. 1983. – 312 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестников. М. : Наука. 2003. – 270 с.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л. : ЛГУ. 1978. – 482 с.
- Chen L., Chen J., Xu Q. Correlations between solid tides and worldwide earthquakes $M_S \geq 7.0$ since 1900 // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2012. Vol. 12. P. 587–590. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-587-2012>
- Cochran E., Vidale J., Tanaka S. Earth Tides Can Trigger Shallow Thrust Fault Earthquakes // Science (New York, N.Y.). 2004. Vol. 306. P. 1164–1166. <https://doi.org/10.1126/science.11039>
- Hattori K. ULF Geomagnetic changes associated with large earthquakes // Terrestrial, Atmospheric and Ocean Sciences. 2004. Vol. 15 (3). P. 329–360. [https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.329\(EP\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2004.15.3.329(EP))
- Karakhianian A.S., Trifonov V.G., Philip H., Avagyan A., Hessami K., Jamali F., Salih Bayraktutan M., Bagdassarian H., Arakelian S., Davtian V., Adilkhanian A. Active faulting and natural hazards in Armenia, eastern Turkey and northwestern Iran // Tectonophysics. 2004. Vol. 380. P. 189–219. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.020>
- Tanaka S. Tidal triggering of earthquakes precursory to the recent Sumatra megathrust earthquakes of 26 December 2004 (Mw 9.0), 28 March 2005 (Mw 8.6), and 12 September 2007 (Mw8.5) // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37 (2). <https://doi.org/10.1029/2009GL041581>
- Yamazaki Y., Rikitake T. Loca anomalous changes in the geomagnetic field at Matsushirc // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1970. Vol. 48. P. 637–643. <https://doi.org/10.15083/0000033311>

LOCAL VARIATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD, HELIUM AND RADON CONCENTRATIONS IN WELLS, AS WELL AS VARIATIONS IN GRAVITY AS POSSIBLE MEDIUM AND SHORT-TERM PREDICTORS OF STRONG EARTHQUAKES ON THE EXAMPLE OF ARMENIA

© 2025 A. G. Grigorian^{1,*}, A. A. Baranov^{2,**}

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow,*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: ag-grig@ifz.ru*

***E-mail: aabaranov@gmail.com*

In order to study the processes in the geological environment during the preparation of strong earthquakes, monitoring was carried out in 1980–1993 on the territory of Armenia for different geophysical fields (geomagnetic, gravitational, geochemical, and radon). The study of changes in the variable geomagnetic field δT was carried out using the ratios of the amplitudes of synchronously measured variations in the components of the δT field in the northern part of Armenia. To assess the change in the state of the geological environment, the calculated parameter $N(A) = A_i/A_j$, was used, the ratio of the amplitudes of the variations in the geomagnetic field caused by an external source and measured synchronously at different pairs of stations. The calculated parameter $N(A)$ characterizes the change in the electromagnetic induction (electrical conductivity) of the geological environment. Before the Spitak earthquake, the values of the parameter $N(A)$ decreased by about 35%. Analysis of data before the Paravan earthquake also shows a sharp drop in the values of this parameter by 20–25%. Changes in the calculated parameter $N(A)$ show that the electromagnetic induction or electrical conductivity has changed in the studied geological environment. The concentration of subsurface radon at the Jermuk station before the Spitak earthquake increased by 15%, while at the Leninakan station, on the contrary, it decreased. Several months before the Spitak earthquake, mantle helium appeared in the Kajaran well, which usually appears before strong earthquakes. In the northern part of Armenia, where gravity measurements were taken, anomalous changes were also recorded before the Spitak earthquake. The obtained anomalous changes in geophysical fields are possible geophysical precursors of the Paravan (13.05.1986, $M = 5.4$) and Spitak (07.12.1988, $M = 7.0$) earthquakes.

Keywords: anomalous variations of the Earth's geomagnetic field, earthquake precursors, processes in the earth's crust, preparation of large seismic events, induction, electrical conductivity, deep fluid-dynamic systems, radon, helium.