

УДК 550.38+551.510.535+551.594

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЧЁРНОМ МОРЕ 12.01.2025 г.

© 2025 г. Академик РАН В. В. Адушкин¹, А. А. Спивак^{1,*},
Ю. С. Рыбнов¹, С. А. Рябова^{1,**}, А. В. Тихонова¹

Поступило 03.02.2025 г.

После доработки 07.02.2025 г.

Принято к публикации 24.02.2025 г.

На основе анализа результатов инструментальных наблюдений показано, что землетрясение магнитудой 4.2, произошедшее 12.01.2025 г. в Чёрном море, сопровождалось хорошо регистрируемыми акустическими эффектами и вариациями электрического и магнитного полей, зарегистрированных на значительном расстоянии от очага сейсмического события. Установлен ионосферный эффект рассматриваемого землетрясения в виде вариаций критической частоты $F2$ -слоя ионосферы f_0F2 , по данным станции наземного зондирования “Никосия”, расположенной на расстоянии 1113 км от эпицентра землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, инструментальные наблюдения, акустический сигнал, электрическое поле, магнитное поле, критическая частота $F2$ -слоя ионосферы, вариация

DOI: 10.31857/S2686739725060158

Землетрясения представляют собой мощный источник возмущения геофизической среды. Традиционно основное внимание уделяется описанию эффектов и последствий наиболее сильных сейсмических событий разрушительного типа магнитудой по крайней мере 5.0 и выше, очаги которых, как правило, приурочены к мощным тектоническим структурам. Вместе с тем с точки зрения получения информации о геофизических последствиях землетрясений, установления их внутренних механизмов и закономерностей развития, а также для разработки научных основ теоретических и феноменологических моделей как самого явления, так и его влияния на среду обитания, представляет интерес рассматривать события и меньшего масштаба.

В этом смысле представляет интерес недавнее землетрясение, произошедшее в акватории Чёрного моря 12.01.2025 г. Сейсмическое событие магнитудой 4.2 произошло в 14:49:09 UTC на глубине ~44.6 км. Координаты очага по информации

USGS¹ составили 44.684°с.ш., 36.576°в.д., что определило достаточно близкие расстояния от очага события до ближайших российских портовых городов: от ~50 км (Анапа) до ~117 км (Феодосия) (рис. 1). Здесь следует отметить, что основная особенность морского расположения очагов землетрясений в отличие от континентальных событий заключается в повышенных амплитудах вертикальных смещений в эпицентре очага и, как следствие, — повышенных амплитудах вызванных акустических возмущений в приземном слое атмосферы, которые представляют собой один из основных факторов, определяющих возмущения геофизических полей [1–3].

Несмотря на значительное количество исследований, выполняемых с целью определения геофизических эффектов землетрясений, до настоящего времени ощущается ограниченность данных инструментальных наблюдений, основываясь на которых можно адекватно описывать последствия сейсмических событий для среды обитания.

В настоящем сообщении рассматриваются геофизические эффекты Черноморского землетрясения 12.01.2025 г. в виде микробарических вариаций, вариаций электрического и магнитного поля Земли в приземном слое атмосферы.

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: spivak@idg.ras.ru

**E-mail: riabovasa@mail.ru

¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

Следует отметить, что возмущения электрического и геомагнитного поля при землетрясениях происходят не только в период основного толчка, но также в виде опосредованной реакции на сейсмические волны, а также на приход в точку наблюдений акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу.

При выполнении настоящей работы в качестве исходных данных использовались результаты инструментальных наблюдений, выполненных в основном в Геофизической обсерватории “Михнево” (МНУ, 54.96° с.ш.; 37.76° в.д.) [4]. Регистрация временного хода атмосферного давления и других метеопараметров, характеризующих состояние атмосферы, выполнялась с помощью автоматизированной цифровой метеостанции Davis Vantage Pro 2. Микробарические вариации регистрировались с помощью микробарометра МБ-03, который обеспечивал измерение акустических сигналов амплитудой P от 0.01 до 200 Па в диапазоне частот 0.0003–10 Гц (по уровню – 3 дБ). Поиск акустических сигналов, вызванных землетрясением, выполнялся на основе анализа исходной записи микробарометра в диапазоне частот 0.005–0.1 Гц с учётом расстояния до источника сигнала (~1146 км) и вероятной скорости его распространения в стратосферном волноводе (280–310 м/с) [5, 6]. Дополнительная регистрация микробарических вариаций в Центре геофизического мониторинга Москвы позволила определить пеленг на источник, что подтвердило происхождение зарегистрированного сигнала. Измерения вертикальной компоненты напряжённости электрического поля E_z выполнялись регистратором напряжённости электрического поля BOLTEK EFM-100 в диапазоне частот 0–10 Гц. Компоненты магнитной индукции B_x , B_y и B_z , ориентированные соответственно в направлении север–юг, восток–запад и вертикально вниз, регистрировались с использованием цифрового трёхкомпонентного феррозондового магнитометра LEMI-018 с частотой дискретизации 1 Гц. При анализе вызванных геомагнитных вариаций привлекались также данные ряда магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET, расположенных на разных эпицентральных расстояниях R от очага землетрясения [8] (табл. 1). При анализе влияния землетрясения на ионосферу в нашем исследовании использовались результаты определения критической частоты F_2 -слоя на основе анализа ионограмм, полученных на станции наземного зондирования ионосферы “Никосия”, расположенной на расстоянии 1113 км от эпицентра

землетрясения (ГЕО: 35.03° с.ш.; 33.16° в.д.), и представленных в свободном доступе².

Период рассматриваемого землетрясения характеризовался отсутствием значимых локальных возмущений атмосферного электрического поля, связанных с источниками природного и техногенного происхождения, а также спокойной геомагнитной обстановкой (табл. 2), что упростило выделение вызванных возмущений геофизических полей.

Акустический эффект землетрясения 12.01.2025 г. В нашем случае в МНУ отчётливо зарегистрирован акустический сигнал, распространяющийся по атмосферному волноводу (время прихода ~15:54 UTC). Форма этого сигнала, вызванного землетрясением, приведена на рис. 2 (оценка скорости распространения сигнала даёт величину ~297 м/с, что соответствует диапазону скоростей распространения инфразвуковых волн, распространяющихся в атмосферном волноводе).

Электрический эффект. Результаты регистрации напряжённости электрического поля демонстрируют вариации E_z в период, близкий ко времени основного толчка землетрясения, несколько опережая его, что не противоречит возможным возмущениям геофизических полей в период “созревания” очага сейсмического события [1]. Форма вариаций E_z приведена на рис. 3. Основные возмущения E_z зарегистрированы в течение примерно 25 мин и представлены в целом в виде положительной бухты амплитудой ~43 В/м.

Таблица 1. Данные по магнитным обсерваториям

Код	ГЕО		R , км	B^* , нТл
	Широта	Долгота		
IZN	40.5° N	29.72° E	~730	~3.5
SUA	44.68° N	26.25° E	~820	~4.0
PAG	42.515° N	24.177° E	~1030	~2.5
LVV	49.9° N	23.75° E	~1130	~6.0
MHV	54.961° N	37.763° E	~1146	~6.0
GCK	44.633° N	20.767° E	~1250	~3.0
PEG	38.1° N	23.9° E	~1280	~2.5
LON	45.4081° N	16.6592° E	~1560	~3.0
BDV	49.08° N	14.02° E	~1780	~3.0
DUR	41.39° N	14.28° E	~1840	~2.0
ARS	56.433° N	58.567° E	~2010	~9.0
BFO	48.331° N	8.325° E	~2190	~3.5
EBR	40.957° N	0.333° E	~2960	~3.0

² <https://dataspace.atmospheric-electricity-net.eu/node/114>

Таблица 2. Индексы магнитной активности K (по данным MHV) и K_p (по данным International Service of Geomagnetic Indices (ISGI)) за 12.01.2025 г.

Индекс	Время (UTC)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
K	1	1	1	1	2	1	1	1
K_p	1 ₊	2 ₋	2 ₋	1 ₊	2 ₋	1 ₀	1 ₊	2 ₀



Рис. 1. Схема расположения очага землетрясения (I) и магнитных обсерваторий (коды обсерваторий приведены в поле рисунка)

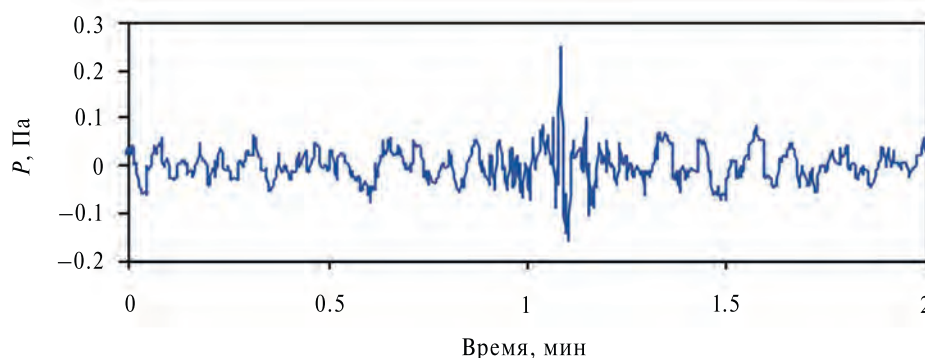


Рис. 2. Запись акустического сигнала в MHV, распространяющегося по атмосферному волноводу (начало записи в 15:53 UTC)

Помимо вариаций в период, близкий к основному толчку, регистрируются вариации E_z в период прихода в точку регистрации инфразвукового сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу. Указанные вариации в виде изменения временного хода E_z приведены на рис. 3 и представляют собой чередование

хорошо выраженной положительной и отрицательной бухты общей длительностью около 2 мин и максимальной амплитудой около 5 В/м.

Магнитный эффект. Данные магнитных измерений свидетельствуют о том, что рассматриваемое землетрясение сопровождалось вариациями геомагнитного поля. На рис. 4 приведены

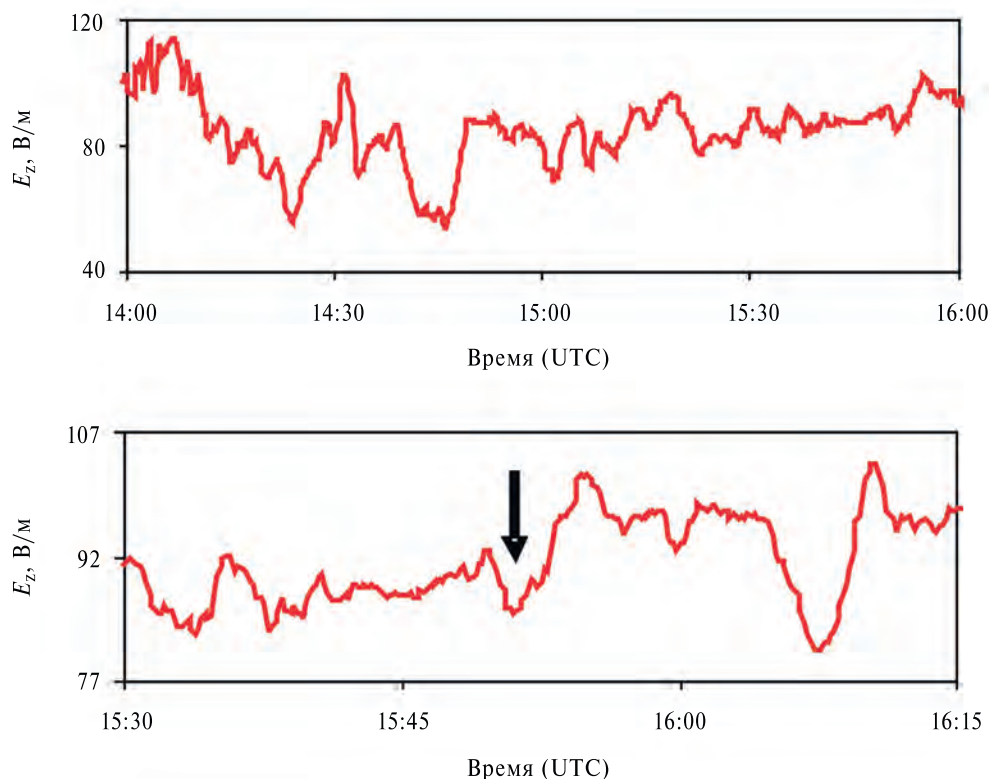


Рис. 3. Вариации вертикальной компоненты напряжённости электрического поля в приземной атмосфере по данным МНУ, вызванные землетрясением (верхняя панель), и приходом акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу (стрелкой обозначено время прихода акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу)

примеры геомагнитных вариаций, вызванных землетрясением 12.01.2025 г., в виде изменения временного хода наиболее чувствительной к внешним возмущениям горизонтальной компоненты магнитной индукции B_x . Из рис. 4 следует, что характер вариаций, зарегистрированных всеми обсерваториями в период, близкий к основному толчку, представляет собой практически синхронные знакопеременные колебания длительностью около 1 часа с хорошо выраженным первым периодом в виде отрицательной бухты. Максимальные амплитуды B^* вариаций компоненты B_x относительно тренда приведены в табл. 1. Полученные данные показывают, что вне зависимости от эпицентрального расстояния R максимальная амплитуда B^* заключена в узком интервале: 2–9 нТл, что вместе с синхронностью возмущений на разных расстояниях может свидетельствовать о высокой вероятности наличия единого источника магнитных возмущений.

Анализ более детальных данных, полученных в МНУ, показывает, что наряду с вариациями магнитного поля в период, близкий к основному толчку, регистрируются вариации магнитного поля в период прихода в точку наблюдений

акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу. Запись зарегистрированного в МНУ этого сигнала приведена на рис. 5. Из рис. 5 видно, что сигнал в виде двойного цуга колебаний общей длительностью около 4 мин характеризуется максимальной амплитудой ~ 1 нТл.

Ионосферный эффект. В настоящей работе выполнялось определение критической частоты $F2$ -слоя ионосферы f_0F2 путём ручной обработки данных станции “Никосия” с интерпретацией по методике URSI [7]. Результаты обработки ионограмм представлены на рис. 6. Из рис. 6 следует, что после сейсмического события в период с $\sim 15:15$ до $\sim 15:55$ UTC наблюдаются ярко выраженные знакопеременные вариации критической частоты f_0F2 с периодом ~ 10 – 20 мин. Затем в период с $\sim 16:25$ до $\sim 17:30$ UTC знакопеременные вариации f_0F2 с периодом ~ 25 – 45 мин. Анализ представленной на рис. 6 записи с использованием данных работ [8–10] позволяет сделать заключение о том, что первое возмущение с большой вероятностью связано с ионосферным откликом на волну Релея от основного толчка землетрясения в Чёрном море, а вторые

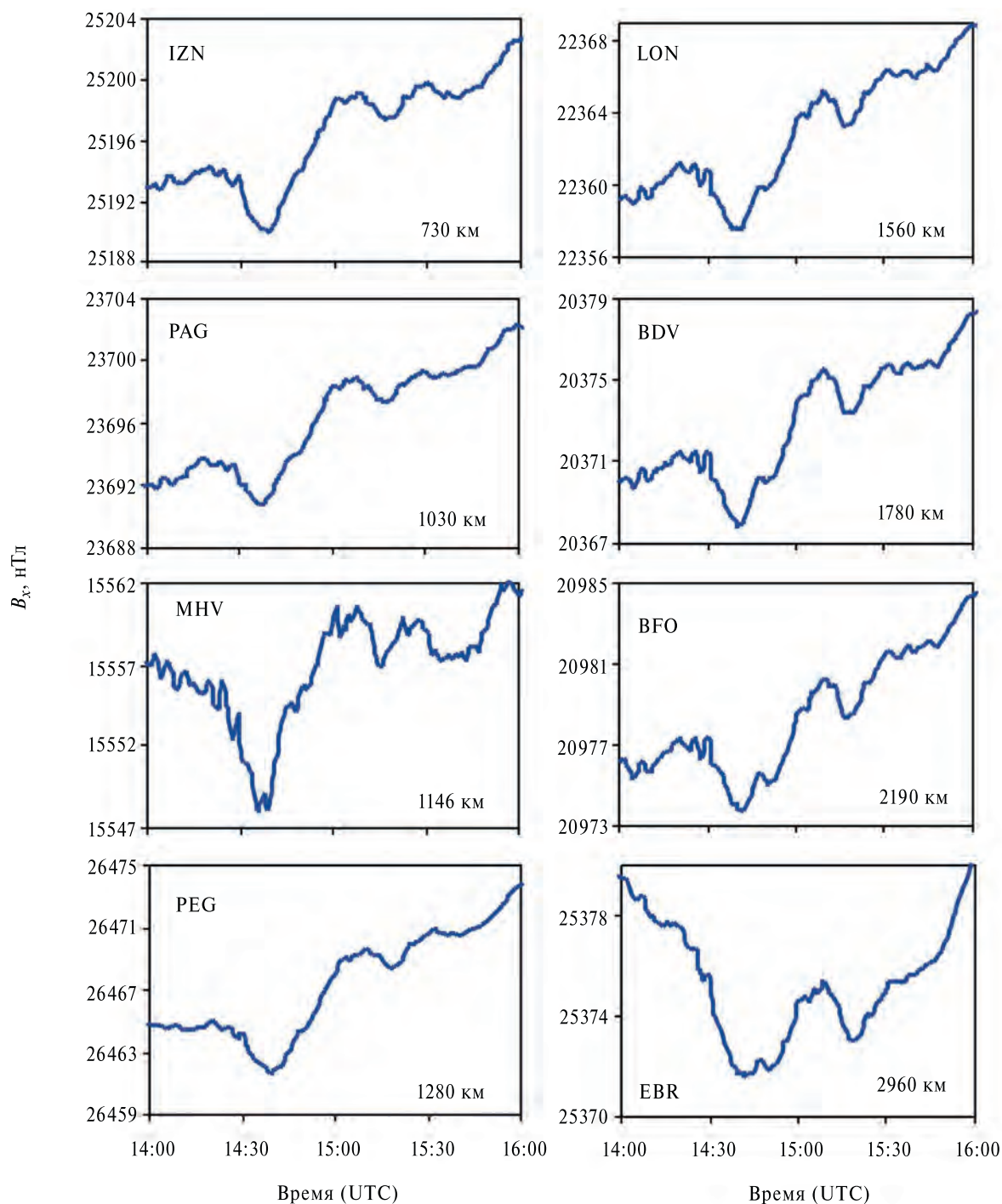


Рис. 4. Вариации компоненты B_x индукции геомагнитного поля, вызванные землетрясением 12.01.2025 г. (коды магнитных обсерваторий и расстояния до очага землетрясения приведены в поле рисунков)

по времени вариации связаны с распространением внутренней гравитационной волны.

Таким образом, можно констатировать, что морское землетрясение магнитудой 4.2 вызывает сложные геофизические эффекты, характер которых требует дальнейшего анализа по мере накопления наблюдательного материала.

Приведённые в настоящем сообщении данные, по мнению авторов, дополняют существующие в настоящее время представления о геофизических последствиях землетрясений разного класса и могут оказаться полезными при разработке и верификации аналитических и численных моделей, всесторонне описывающих энергообменные процессы при сейсмических

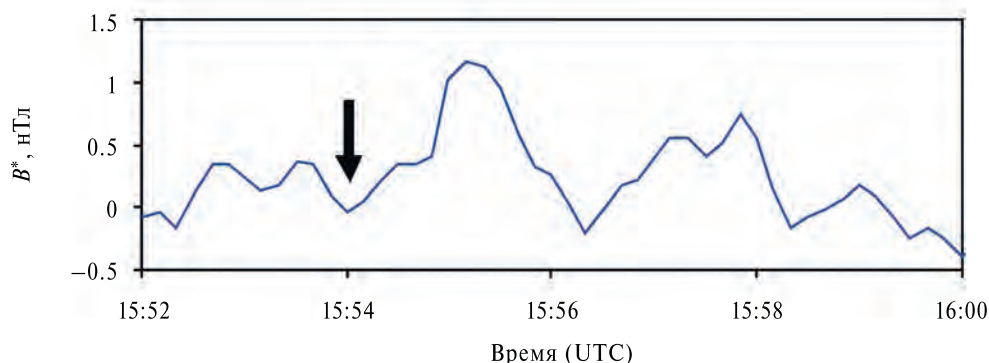


Рис. 5. Вариации компоненты B_x индукции геомагнитного поля относительно тренда B^* , вызванные приходом акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу (стрелкой обозначено время прихода акустического сигнала)

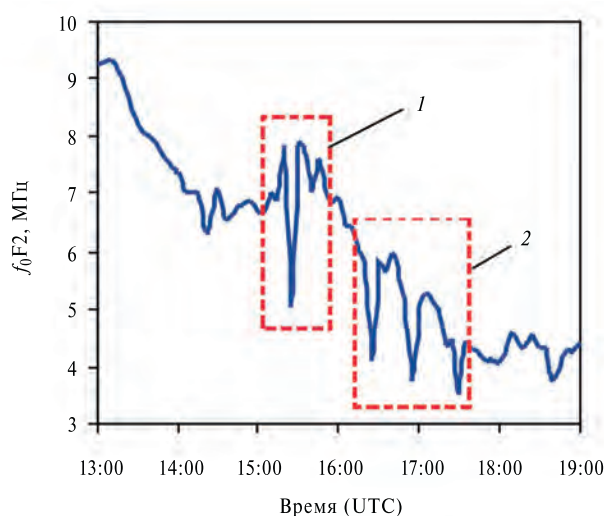


Рис. 6. Вариации критической частоты F_2 -слоя ионосферы за 12 января 2025 г. на станции наземного зондирования ионосферы “Никосия”; 1 – сигнал, вероятно, вызванный волной Релея, 2 – сигнал, вероятно, вызванный распространением внутренней гравитационной волны

событиях, а также их влияние на среду обитания и, в частности, на технические системы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ИДГ РАН № 125012700798-8 “Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А. Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: ГЕОС, 2018. 464 с.

2. Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2020. 464 с.
3. Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
4. Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–119.
5. Куличков С.Н. О распространении волн Лэмба в атмосфере вдоль земной поверхности // Изв. АН СССР. 1987. Физика атмосферы и океана. Т. 23. № 12. С. 1251–1261
6. Куличков С.Н., Авилев К.В., Буш Г.А., Попов О.Е. и др. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 1. С. 3–12.
7. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука, 1977. 342 с.
8. Adushkin V.V., Spivak A.A., Riabova S.A., Tikhonova A.V. Geomagnetic and ionospheric effects of two consecutive strong earthquakes in Morocco on September 8, 2023 // Doklady Earth Sciences. 2024. V. 515. No. 1. P. 502–506. <https://doi.org/10.1134/s1028334x23603395>
9. Adushkin V.V., Spivak A.A., Riabova S.A., Tikhonova A.V. Magnetic and ionospheric effects of a series of strong earthquakes on April 2–3, 2024 (Taiwan) // Doklady Earth Sciences. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24602670>
10. Riabova S.A., Shalimov S.L. Ionospheric response of earthquakes in the Philippines from November to December 2023 // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2024. V. 60. No. 6. P. 1016–1025. <https://doi.org/10.1134/S1069351324701015>

GEOPHYSICAL EFFECTS OF AN EARTHQUAKE IN BLACK SEA ON JANUARY 12, 2025

© 2025 Academician of the RAS V. V. Adushkin^a, A. A. Spivak^{a,#},
Yu. S. Rybnov^a, S. A. Riabova^{a,##}, A. V. Tikhonova^a

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*E-mail: spivak@idg.ras.ru*

^{##}*E-mail: riabovasa@mail.ru*

Based on the analysis of the results of instrumental observations, it is shown that the 4.2 magnitude earthquake that occurred on January 12, 2025 in the Black Sea was accompanied by well-recorded acoustic effects and variations in electric and magnetic fields recorded at a considerable distance from the seismic event. The ionospheric effect of the earthquake under consideration has been established in the form of variations in the critical frequency of the ionospheric $F2$ layer f_0F2 , according to the data of the Nicosia ground-based sounding station located at a distance of 1113 km from the epicenter of the earthquake.

Keywords: earthquake, instrumental observations, acoustic signal, electric field, magnetic field, critical frequency of the ionospheric $F2$ layer, variation