

Черноморские землетрясения конца декабря 2012 г. и их проявления в геомагнитном поле

© А. Л. Собисевич¹, В. И. Старостенко², Л. Е. Собисевич¹, А. В. Кендзера²,
В. Н. Шуман², Ю. М. Вольфман², Э. П. Потемка³,
К. Х. Канониди⁴, В. А. Гарифулин³, 2013

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

³Всероссийский НИИ гидрогеологии и инженерной геологии МПР России, Московская обл.,
Ногинский район, пос. Зеленый, Россия

⁴Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН, Троицк, Москва, Россия
Поступила 7 августа 2013 г.

Представлено членом редколлегии М. И. Орлюком

Наведено результати інструментальних спостережень геодинамічних, геомагнітних та інших геолого-геофізичних процесів у літосфері Північного Кавказу і Криму, які відображують геофізичні збурення, пов'язані з грудневими сейсмічними подіями в цьому районі. Лабораторії Північнокавказької геофізичної обсерваторії ІФЗ РАН і ВСЕГІНГЕО МПР Росії, магнітоваріаційні станції в Алушті і Карпогорах на етапах підготовки і розвитку сейсмічних подій на шельфі Чорного моря в районі Сочі—Сухумі реєстрували аномальні збурення в геофізичних полях. Основну увагу приділено аналізу аномальних «квазігармонійних» магнітних збурень, зафіксованих на етапі підготовки землетрусів у третій декаді грудня 2012 р. Розглянуто морфологічні ефекти у варіаційній структурі геомагнітного поля. Детально обговорено спостережувані зміни в геофізичних полях на етапі підготовки небезпечних сейсмічних подій і проаналізовано причини їх появи.

Results of instrumental observations of geodynamic, geomagnetic and other geologic-geophysical processes in the lithosphere of the North Caucasus and the Crimea have been presented, which reflect geophysical disturbances related to December seismic events in this area. Laboratories of the North Caucasian geophysical observatory IEPH RAS and VSEGINGEO MPR of Russia, magnetic variation stations in Alushta and Karpogores during the stages of preparation and development of seismic events on the shelf of the Black Sea in the area of Sochi—Sukhumi registered anomalous disturbances in geophysical fields. Principal attention has been paid to analysis of anomalous «quasiharmonic» magnetic disturbances registered during the stage of earthquakes preparation during the third decade of December 2012. Morphologic effects in variation structure of geomagnetic field have been considered. The observed changes in geophysical fields during the preparation of hazardous seismic events are being considered in details and the reasons of their appearance are being analyzed.

Сейсмическая активность Крымско-Кавказского региона обусловлена его принадлежностью к альпийскому Средиземноморско-Гималайскому поясу, который образовался в результате коллизии Евразии с Африканской, Аравийской и Индийской литосферными плитами. Значительное количество упругой энергии, возникающей в результате геодинамического взаимодействия геологических структур этого пояса, реализуется в виде землетрясений разной интенсивности, в том числе катастрофических и разрушительных. В пределах Крымско-Кавказского региона из-

вестны катастрофическое землетрясение 20 февраля 1920 г. в Гори (Грузия) с магнитудой $M=6,2$, разрушительные землетрясения 1927 г. в Крыму [Двойченко, 1928], катастрофическое землетрясение с магнитудой 7,2, произошедшее 7 декабря 1988 г. в Спитаке [Спитакское..., 1998], и ряд других. На сайте Мирового центра данных «Б» по физике твердой Земли и Геофизического центра Российской академии наук приведен «Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4,0$ ($K \geq 11,0$) с древнейших времен по 2000 г.», составленный А. А. Годзиковской, который насчитывает 2427 событий [Каталог..., 2001].

Высвобождение накопившейся энергии, сопровождаемое землетрясениями в Крыму и на Кавказе, происходит и в настоящее время. Например, 28 мая 2013 г. в 26 км к юго-западу от курортного города Теберда произошло землетрясение с магнитудой $M=5,2$. Очаг землетрясения залегал на глубине 10 км. В конце декабря 2012 г. район Большого Сочи—Сухуми и прилегающие территории оказались в зоне ощутимых землетрясений с магнитудами порядка 4,4—5,6. Сейсмические события такого масштаба заставляют волноваться организаторов будущих зимних Олимпийских игр.

Прежде чем переходить к комплексной оценке геофизических процессов, связанных с развитием сейсмических событий в конце декабря 2012 г., проанализируем геодинамическое состояние региона на основе данных, полученных в лабораториях Северо-Кавказской

геофизической обсерватории ИФЗ РАН [Соби-севич и др., 2008a] и ВСЕГИНГЕО МПР России. Здесь в четырех лабораториях, расположенных в районе Эльбрусской вулканической области, ведется комплексный мониторинг окружающей среды, включающий:

- наклонметрические измерения;
- магнитовариационные измерения;
- региональные и локальные сейсмические измерения;
- контроль климатических параметров (давления и температуры);
- геодеформационный и гидрологический скважинный мониторинг, позволяющий анализировать напряженно-деформированное состояние в пределах больших ареалов геологической среды;
- газогидрогеохимический мониторинг, использующий индикацию газов глубинного

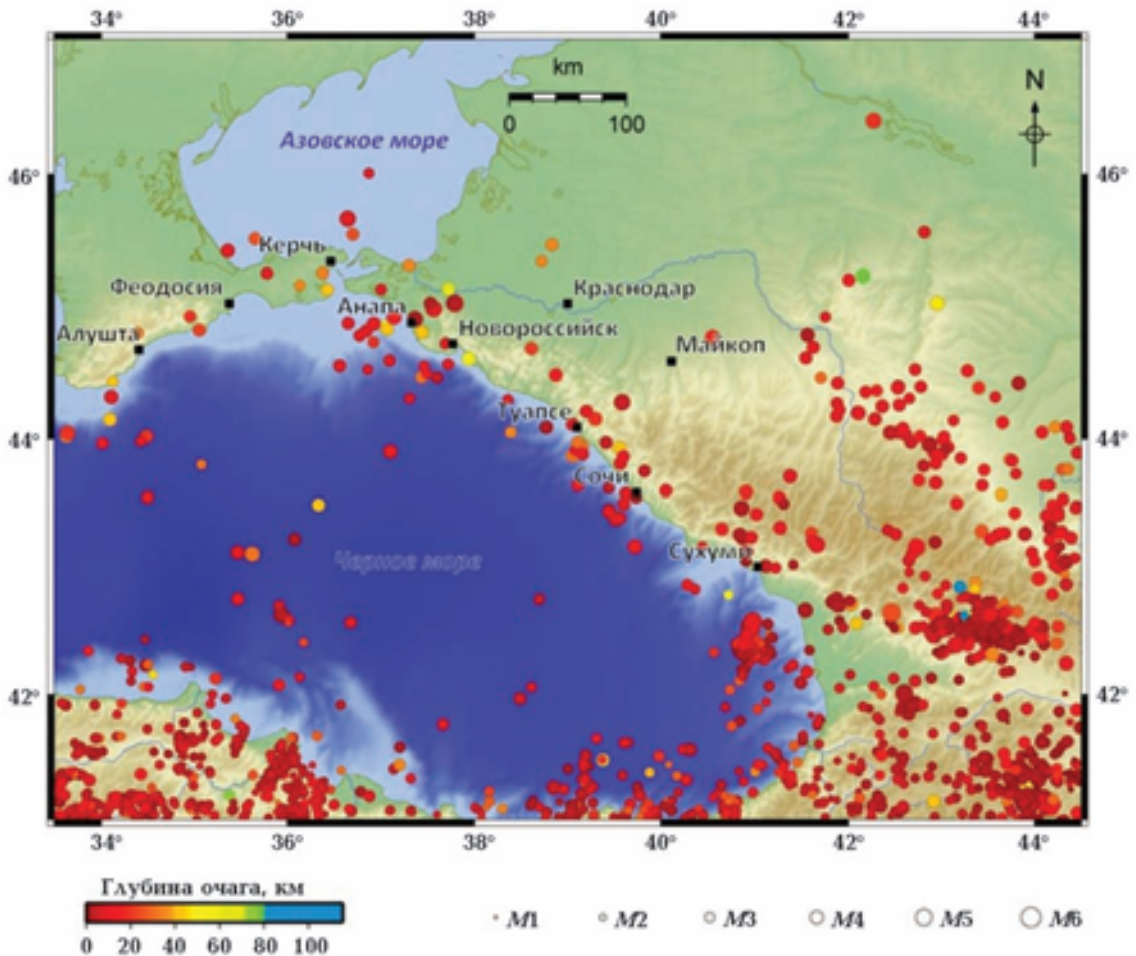


Рис. 1. Карта сейсмичности Западного Кавказа по данным каталога EMSC за период с 09. 01.1998 (08:49:18) по 01.05.2013 (01:44:09).

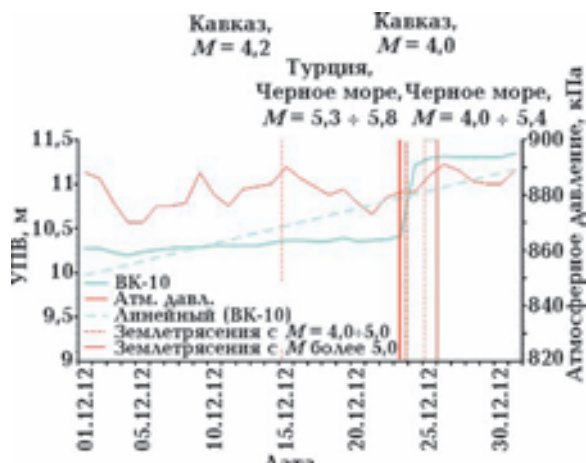


Рис. 2. Изменения уровня подземных вод по скважине ВК-10 и атмосферного давления за декабрь 2012 г.

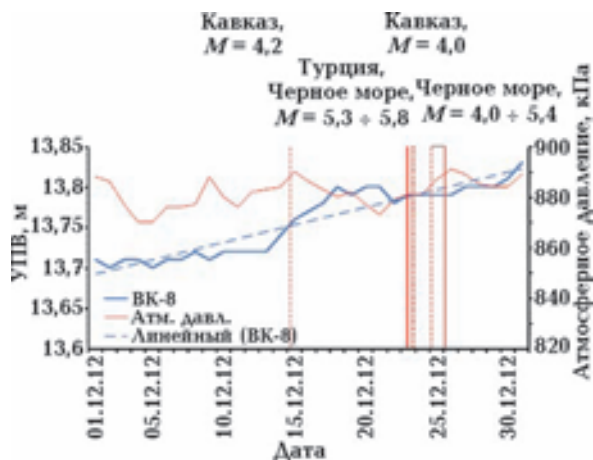


Рис. 3. Изменения уровня подземных вод по скважине ВК-8 и атмосферного давления за декабрь 2012 г.

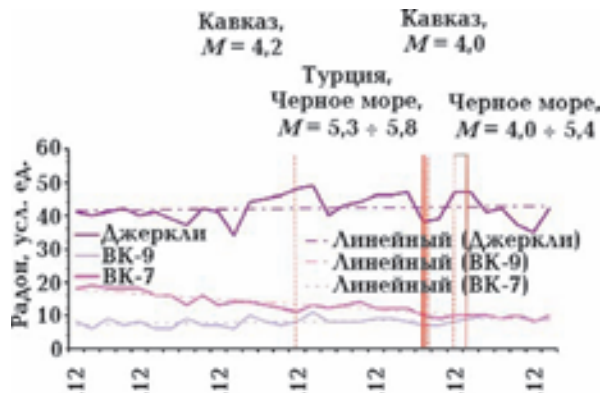


Рис. 4. Изменения содержания радона в воде естественных источников (Центральный сегмент Северного Кавказа — декабрь 2012 г.).

генезиса (радон, торон, гелий) для оценки активности эндогенных процессов в регионе.

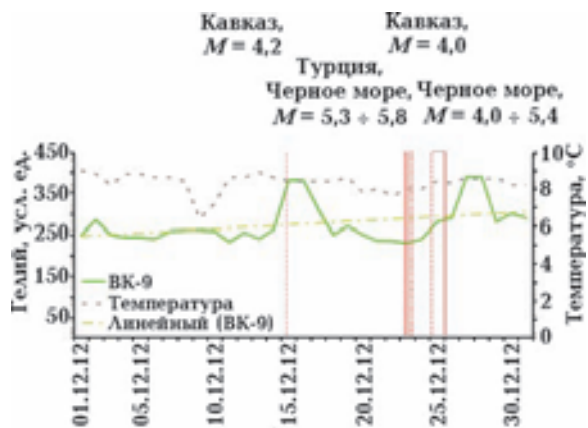


Рис. 5. Изменения содержания гелия в воде и температуры в скважине ВК-9 (Центральный сегмент Северного Кавказа — декабрь 2012 г.).

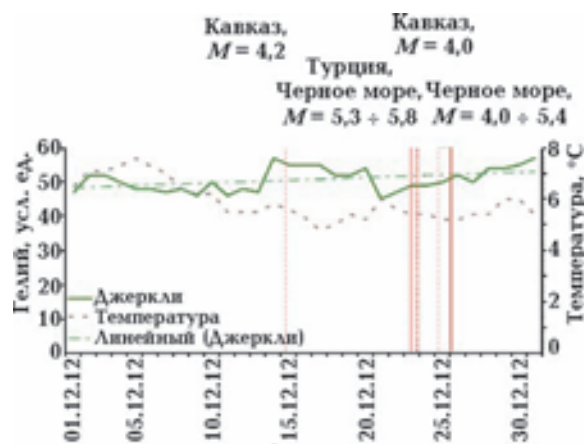


Рис. 6. Изменения содержания гелия в воде и температуры источника углекислых вод Джеркли (Центральный сегмент Северного Кавказа — декабрь 2012 г.).

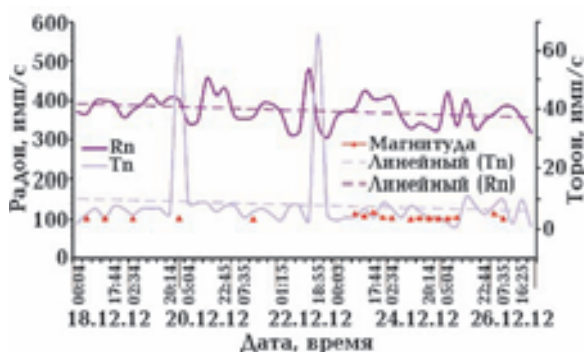


Рис. 7. Изменения содержания радона и торона в почвенном воздухе Северного разлома (Хасукский сдвиг) в период с 18 по 26 декабря 2012 г.

Комплексный анализ результатов мониторинга, учет и оценка сведений о режимобразующих факторах дают обоснованное пред-

ставление о развивающихся геодинамических процессах и позволяют оценить состояние сложнопостроенной геологической среды в этом сейсмоопасном районе с возможным выходом на прогноз катастрофических сейсмических событий в будущем.

Геолого-геофизическая позиция и сейсмическая активность в районе Северного Кавказа и Сочи. Тектонические и геодинамические процессы эндогенной и экзогенной природы Северного и Северо-Западного Кавказа определяются условиями его геологического развития, приуроченностью к разрывным сейсмогенерирующим и шовным зонам структур первого порядка. В них прослеживаются дифференцированные тектонические движения, которые обуславливают сейсмическую активность [Собисевич, 2012].

Современные движения в пределах Большого Сочи сильно дифференцированы и характеризуются довольно низкими скоростями в пределах шельфовой области (от $-0,8$ до $+0,9$ мм/год) и до $8-12$ мм/год в осевой части Главного Кавказского хребта. Современные движения Большого Кавказа хорошо отображают особенности его морфоструктуры — наблюдается продольная зональность, выраженная в нарастании скоростей в меридиональном направлении от периферии горного сооружения к его осевой части и сопровождающаяся значительными градиентами.

Южный склон Большого Кавказа характеризуется чередой периодов сейсмической активности и затиший. Например, в районе Красной Поляны 28 января 1909 г. было зарегистрировано землетрясение силой 6 баллов, 21—27 декабря 1955 г. — в 7—8 баллов, 3 января 1956 г. — в 6—7 баллов. Эпицентры землетрясений силой до 6 баллов сосредоточены в сравнительно узкой полосе вдоль кавказского берега Черного моря от Сочи до Сухуми (рис. 1).

Напряженно-деформированное состояние геологической среды региона во второй половине декабря 2012 г. по результатам скважинных наблюдений в пределах Центрального сегмента Северного Кавказа характеризовалось аномальными амплитудами уровней подземных вод. К этому времени сформировалась обширная зона растяжения, отражающая условия подготовки сейсмических событий средних энергий с общей вероятностью реализации в пределах радиуса 200 км (см. рис. 2—7). Контрастный подъем уровня подземных вод в контрольных скважинах начался 15 декабря 2012 г. Причем по всем фиксируемым параметрам

(температуры подземных вод, объемных содержаний радона, торона и гелия) тенденция трансформации напряжений сохранилась практически до 19 января 2013 г.

По полученным данным сейсмически активными в декабре месяце 2012 г. являлись:

- Терско-Сулакская зона прогибов;
- Новороссийско-Лазаревская складчатая зона;
- разлом I порядка в пределах юго-восточной части Восточно-Кубанского прогиба;
- складчатая зона Главного хребта на территории Грузии;
- область континентального шельфа Черноморской впадины в зоне влияния глубинного разлома.

В соответствии с известной схемой глубинного строения региона большинство эпицентров местных слабых землетрясений декабря тяготеют к межблоковым шовным зонам.

По результатам газогидрохимического мониторинга в годовом цикле просматривается тенденция повышения объемного содержания гелия в воде на фоне сезонного увеличения выноса газа. Контрастное повышение объемного содержания гелия в воде отмечено 15—16 и 27—28 декабря 2012 г. Именно в этот период сейсмическая активизация наблюдалась и на Кавказе, и на шельфе Черного моря.

Опираясь на результаты геодеформационного мониторинга, наблюдаемую в декабре активизацию напряженно-деформированного состояния геологической среды следует относить к верхнефоновой по средним многолетним региональным оценкам. Наблюдаемые при этом аномалии в геофизических полях отражают, предположительно, развитие в районе Большого Сочи и на прилегающих территориях отдельных очагов напряжений, характерных для сейсмических событий с магнитудой малых (чуть выше 3) или средних (с магнитудой не более 4—5) энергий, подготовка которых происходит на глубинах порядка 10—15 км. При сохраняющемся тренде их повторение в 2013 г. является весьма вероятным.

Итак, результаты газо-гидрогеохимического мониторинга позволяют оценить современную геодинамическую обстановку в районе Большого Сочи и на прилегающих территориях как «условно» спокойную. Такое заключение можно сделать, если учесть, что в большей части территории Северо-Кавказского региона состояние геологической среды в конце 2012 — начале 2013 г. оставалось на уровне фоновых значений. Отклонения наблюдались только в

первой и второй декаде декабря, когда участилась повторяемость слабых сейсмических событий в регионе с магнитудами до 3,5, а уже в третьей декаде декабря произошло несколько заметных землетрясений.

По данным сейсмических станций Геофизической службы РАН в декабре 2012 г. на территории западной части Северо-Кавказского региона зафиксировано четыре слабых землетрясения с магнитудами не выше 3,7 и три с магнитудами выше 4,5.

Сетью сейсмических станций Геофизической службы РАН и аппаратурными комплексами Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН 23 декабря 2012 г. в 17:31 по московскому времени (13:31:39.6 UTC) в Черном море у побережья Абхазии было зафиксировано ощутимое землетрясение с магнитудой 5,6. Эпицентр этого сейсмического события находился в 65 км к западу от Сухуми на шельфе Черного моря. Эпицентральная зона сформировалась на глубине 10 км. Координаты эпицентра — 42,47°N, 41,03°E. Затем 25 декабря в Черном море у побережья Абхазии было зафиксировано еще два землетрясения с магнитудами 5,4 и 4,4 (рис. 8).

Волновые формы наведенных аномальных

магнитных возмущений, предваряющие эти землетрясения, отчетливо проявились перед первыми сейсмическими ударами.

Следует отметить, что природа аномальных магнитных возмущений в магнитном поле Земли на всех этапах развития коровых и глубокофокусных землетрясений остается пока дискуссионной среди геофизиков.

Анализ работ ведущих ученых России и Украины, посвященных проблемам генерации магнитных возмущений, а также результаты наших наблюдений дают основания полагать, что причины появления аномальных магнитных возмущений связаны с процессами разделения зарядов на этапе формирования разрывов геологической среды в районе развивающейся эпицентральной зоны [Adushkin, Soloviev, 1996; Николаевский, 2011; Собисевич, 2012].

Однако, прежде чем переходить к анализу аномальных магнитных возмущений, имевших место в районе Большого Сочи, остановимся кратко на истории вопроса и оценим современное состояние изученности этой проблемы.

История вопроса. Характеризуя затронутую проблему, отметим, что приоритет открытия аномальных магнитных возмущений в

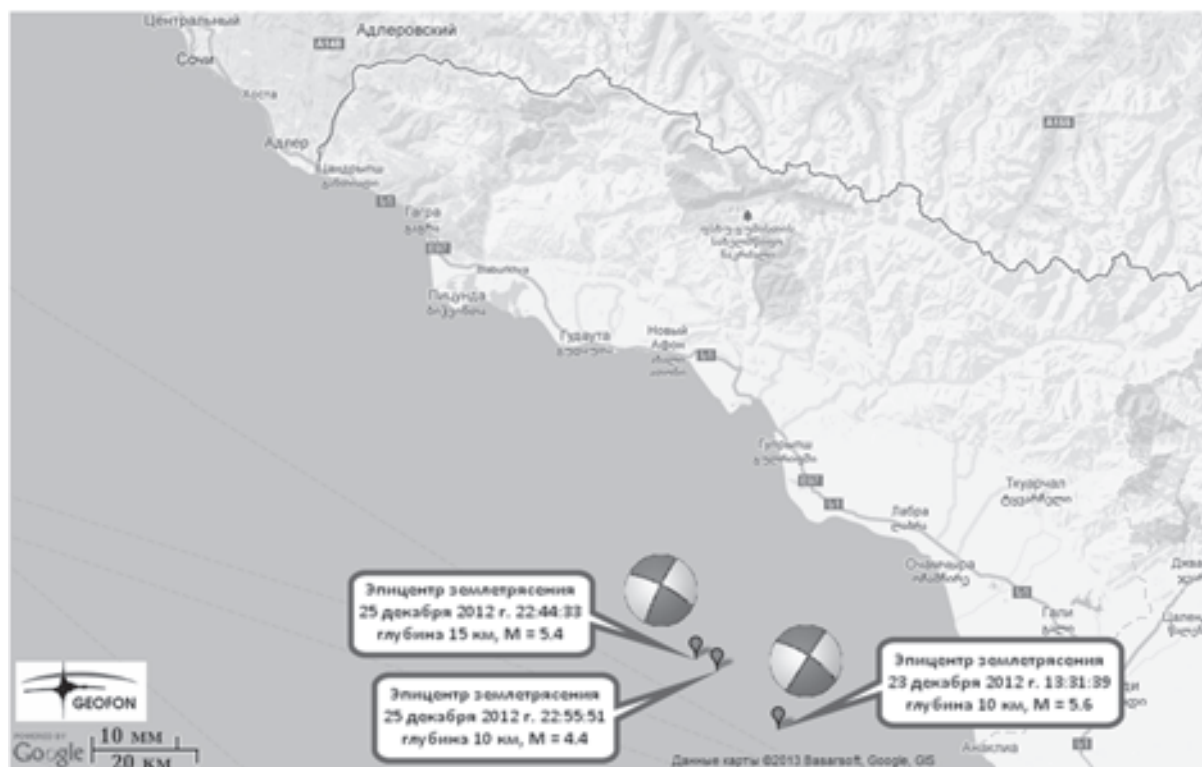


Рис. 8. Сейсмические события 23 и 25 декабря 2012 г.

структуре наведенных магнитных возмущений перед крупными сейсмическими событиями принадлежит известному ученому Джорджу Муру. Ему удалось впервые в истории инструментальных наблюдений в 1964 г. выделить характерные магнитные волновые формы в диапазоне 10—20 Гц за 2 ч до начала катастрофического цунамигенного землетрясения на Аляске 27 марта 1964 г. [Moore, 1964].

Среди сейсмологов обнаруженное Джорджем Муром аномальное геофизическое явление было воспринято неоднозначно. В известной статье американского ученого А. Фрезер-Смита эта проблема детально анализируется [Fraser-Smith, 2008]. Однако замеченные впоследствии многими исследователями «связи» сильных землетрясений с магнитными бурями и другими процессами в ионосфере, атмосфере и литосфере побудили геофизиков продолжить изучение наведенных магнитных возмущений в широком диапазоне частот. Аномальные флуктуации магнитного поля Земли перед сейсмическими событиями были отмечены в разных работах российских и украинских ученых [Моргунов и др., 1990; Липеровский и др., 1992; Бахмутов и др., 2003; Гульельми, 2007; Гохберг, Шалимов, 2008 и др.].

Как свидетельствует эксперимент, наблюдается большое разнообразие электромагнитных возмущений, регистрируемых в системе литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера в исключительно широком диапазоне частот (от 10^{-4} до 10^6 Гц и выше). Одни из них возбуждаются источниками в атмосфере (грозовые разряды, предгрозовое излучение, радиоизлучение облаков и циклонов), другие возникают в магнитосфере и ионосфере в результате взаимодействия солнечного ветра с геомагнитным полем или проникают в магнитосферу и атмосферу из межпланетной среды, третьи генерируются источниками в литосфере. Регистрируются также сигналы, связанные с индустриальной деятельностью [Гохберг и др., 1985; 1988; Гульельми, 1989; 2007; Сурков, 2000; Шуман, 2007 и др.].

Многочисленные литературные источники указывают также на реальность проявления сейсмозлектромагнитной активности в земной коре [Гохберг и др., 1988; Гульельми, 2007 и цитируемая там литература]. Отмечается, что наибольший интерес для геофизических приложений представляют низкочастотные электромагнитные поля (диапазон периодов 0,2—600 с), генерируемые крупномасштабными тектоническими процессами, приводящи-

ми к деформациям и разрушению локальных объемов земной коры.

Имеющиеся наблюдения свидетельствуют о том, что генерация электромагнитных импульсов в земной коре может происходить как вынужденно, вследствие движения горных пород при сейсмическом воздействии, так и спонтанно, вне прямой связи с проявлением сейсмичности [Сидорин, 1992; Левшенко, 1995; Глинский и др., 1996; Гульельми, 2007; Sobisevich et al., 2010]. Профессор А. В. Гульельми в своей основополагающей статье рассматривает четыре механизма генерации сейсмозлектромагнитных возмущений: инерционный, индукционный, деформационный и пьезомагнитный, приводит их сравнительный анализ и выписывает уравнение генерации, учитывающее все основные элементы механики горных пород: ускорение, скорость деформации и напряжение [Гульельми, 2007].

Вопрос о генерации ультранизкочастотных геомагнитных возмущений, обусловленных сейсмическими волнами, возникающими при разрушении проводящего вещества (горной породы) находящегося в магнитном поле земного ядра, детально исследован В. В. Сурковым (2000). Стало очевидным, что в широком смысле вопрос о природе геомагнитных возмущений рассматриваемого типа, их источниках и механизмах является фундаментальным. Анализируя историю развития работ по изучению электромагнитных возмущений, следует обратиться к первоисточникам. По-видимому, А. Г. Иванов был первым, кто еще в первой половине прошлого века установил существование неизвестного ранее сейсмозлектромагнитного эффекта второго рода — эффекта «электризации» локальных геологических структур в сейсмических полях — и изучил его особенности [Иванов, 1939; 1940]. Теоретические основы эффекта были разработаны Я. И. Френкелем [Френкель, 1944]. Суть явления состоит в том, что сейсмическая волна создает деформацию пористой горной породы. В жидкости, заполняющей поры, возникает градиент давления и, как следствие, возникает электрический ток.

До появления работ А. Г. Иванова геофизики знали о существовании сейсмозлектромагнитного эффекта, обусловленного протекающим током. Сейсмозлектромагнитная установка, предложенная геофизиками Блау и Статхемом, должна была заменить (или дополнить) данные, получаемые с помощью геоакустических датчиков во время проведения сейсмической разведки методом отраженных волн. Они ус-

тановили, что под действием сотрясений сила электрического тока в геоэлектрической цепи изменяется и, следовательно, можно регистрировать упругие колебания в Земле [Pat. 2054067USA, 1936].

А. Г. Иванов предложил назвать сейсмоэлектрический эффект при наведенном токе в геоэлектрической цепи «эффектом I», а новый, открытый им сейсмоэлектрический эффект, — «эффектом E». Оба эти эффекта с двух сторон характеризуют физическую природу единого комплекса сейсмоэлектрических и наведенных магнитных явлений, наблюдаемых в реальных разломно-блоковых структурах геологической среды.

Открытый А. Г. Ивановым эффект E отличается от эффекта I. Их наблюдение необходимо осуществлять двумя различными методами:

- эффект I изучают при наличии тока в цепи электродов,
- эффект E изучают посредством регистрации изменений разностей потенциалов между отдельными точками в земле (без тока в цепи).

Сегодня мы знаем, что геофизические процессы, сопровождающие эти два эффекта, в некоторой своей части различны.

А. Г. Ивановым было открыто существование эффекта электризации разломно-блоковых геологических структур под воздействием сейсмических процессов. В основу были положены сведения о том, что распространение сейсмических возмущений связано с трансформацией геологических структур и что именно трансформация приводит к появлению эффекта электризации отдельных локальных образований горной породы. Последующие полевые работы и лабораторные эксперименты позволили А. Г. Иванову доказать существование эффекта E.

Спустя 40 лет в известной статье В. С. Куксенко с соавторами [Куксенко и др., 1981] экспериментально было показано, что «в условиях естественного залегания пород медленные процессы перераспределения напряжений должны сопровождаться протеканием поляризационных токов, успевающих компенсировать электростатическую составляющую. Плотность токов зависит от конкретных условий и по данным лабораторных измерений может достигать до 10^{-4} А·м⁻². Поляризационные токи направлены вдоль градиентов механических напряжений и могут охватывать обширные области с выходом на дневную поверхность земной коры» [Куксенко и др., 1981]. При этом независимо от

характера развития деформационного процесса, например в зоне подготовки сейсмического события, появление электрического поля и его скачкообразные вариации будут отражать динамические и геоэлектрические процессы в очаге разрушения, определяющие структуру наводимых магнитных возмущений.

Здесь уместно вспомнить, что именно во второй половине прошлого столетия бурное развитие получила новая отрасль науки — разведочная геофизика, которая сразу взяла на вооружение обнаруженные эффекты. Этому в значительной мере способствовали и другие достижения экспериментальной геофизики в первой половине XX в., позволившие обоснованно выдвинуть вопрос о применении физических методов исследования к разломно-блоковым структурам геологической среды. Сегодня здесь можно выделить два активно развиваемых научных направления, в которых создаются новые прогрессивные технологии изучения реальных геологических образований в сложнопостроенных структурах земных геосфер:

- к первому относятся технологии, в основе которых используется информация, получаемая при анализе естественных геофизических полей Земли, наведенных собственными колебаниями различного рода неоднородных образований и движениями в геосферах;
- ко второму относятся технологии, в основе которых используются искусственно создаваемые геофизические поля в литосфере, что позволяет изучать изменения основных параметров наведенных волновых структур от участка к участку, определяя строение геологической среды и латеральные изменения ее свойств.

Физические и геофизические методы исследований наведенных волновых процессов являются основным источником информации при прогнозировании сейсмических катастроф, поиске полезных ископаемых и других работ. Однако пока не все возможности исчерпаны в указанном направлении, и расширяющиеся практические запросы требуют дальнейшего развития этой интересной отрасли знания. А это значит, что получение новых данных об аномальных геофизических возмущениях, которые удастся выделить в вариациях магнитного поля Земли на всех этапах подготовки и развития землетрясений как на суше, так и в море, представляется крайне необходимым [Собисевич, 2012].

Детально геофизические процессы в зоне подготовки сейсмического события проанализированы в известной статье профессора В. Н. Николаевского «Очаг землетрясения — события и предвестники удара» [Николаевский, 2011]. Согласно его выводам, «в зоне подготовки сейсмического события «зоны» сжатия и растяжения возникают практически одновременно. Как и при взрыве, избыточный объем, возникший за счет трещиноватости зоны растяжения, вытесняется (иначе говоря, контур зоны разрушения перемещается) во внешний упругий массив». За счет реальной геологической неоднородности в нем возникают структуры уплотнения (компакции), разгрузка напряжений в которых и приведет в дальнейшем к удару – собственно землетрясению. Период подготовки землетрясения проходит квазистатически, возможно за счет несогласованности, и с форшоками. Хотя на уровне отдельных трещин происходит неравновесное разрушение массива, в масштабе геологических массивов и разломов процесс описывается упругопластической моделью континуального деформирования с локализацией отдельных временных дилатансионных и компакционных структур. В ходе развития этого процесса может происходить и скольжение, особенно вдоль ранее существовавших разломов. Локализация может быть ускорена поступлением воды в вакуумированное поровое пространство, снижением поверхностной энергии Гриффитса свежих трещин и их быстрым прорастанием. Именно этим завершается внутреннее развитие зон разрушения в очаге землетрясения. Зоны разрушения «мгновенно» лишаются своего объема, а из зон упругого сжатия происходит динамическая отдача упругой энергии.

Сегодня мы знаем, что важным параметром, который отражает масштабы разуплотнения разломно-блоковых образований в земной коре, служит поведение коды S -волн. В. Н. Николаевский в своих работах показывает, что в масштабах региональной тектоники целые этажи коры могут работать как гигантские дилатирующие образования, обеспечивая условия для формирования аномальных геофизических процессов. Здесь могут реализоваться геолого-геофизические процессы, определяющие условия квазистатического динамического взаимодействия (уплотнения или разуплотнения) «электростатических» образований дилатансного типа [Николаевский, 1970, 1982, 2010, 2011; Собисевич, 2010, 2012].

В результате «квазистатической» перестройки структуры геологической среды в зоне подготовки сейсмического события и следующего затем, на последнем этапе, разрушения в эпицентральной зоне удастся наблюдать множество физических предвестников различной природы, отражающих условия подготовки главного удара. В их числе изменения уровня грунтовых вод в скважинах и радона-222 — радиоактивного газа (период полураспада 3,8 суток) на свободной поверхности. На этапе развития областей дилатансии его концентрация возрастает, а затем, перед самым ударом, спадает из-за последовательного растрескивания и сжатия (см. рис. 2). Приток грунтовых вод нивелирует эти события.

Все отмеченные выше геодинамические процессы проявляются также в виде аномальных возмущений в магнитном поле Земли.

Обратим внимание на важное обстоятельство: классические модели генерации спонтанных электромагнитных возмущений, за некоторыми исключениями, существенно опираются на модель сплошной среды и используют математический аппарат, оперирующий, главным образом, гладкими функциями пространства и времени. Однако представления последних лет о геологической среде как открытой неравновесной диссипативной системе с множеством самоорганизующихся структур, в значительной степени лишают исследователей такой возможности [Лукк и др., 1996; Николаев, 2002; Геншафт, 2009 и др.]. Характерными свойствами геологической системы являются:

- диссипативность динамики;
- компенсация потерь за счет действия внешних источников энергии;
- активность ее отдельных элементов.

Неклассические механизмы генерации и распространения спонтанных электромагнитных возмущений основаны именно на таких представлениях о геологической среде [Шуман, 2010, 2012, 2013]. Следует учитывать также возможность различного физического содержания процессов, определяющих генерацию возмущений различной природы на отдельных уровнях самоподобной блоковой структуры реальной геологической среды в зоне подготовки сейсмического события.

Активность геологической среды, проявляющаяся в виде высоких концентраций потока мощности вблизи индивидуальных эмиссионных источников, порождает интенсивное взаимодействие эмиссионных и внешних полей, сильные нелинейные трансформации послед-

них. Заметим также, что сейсмоакустическая и электромагнитная эмиссии как компоненты региональных сейсмических и электромагнитных шумов — это универсальный эффект, обусловленный наличием диффузии.

Весьма вероятно, что сейсмоакустический и электромагнитный шумы литосферного происхождения могут быть истолкованы в терминах автоколебаний — незатухающих возмущений, поддерживаемых внешними источниками энергии в нелинейной диссипативной геологической среде.

Неустойчивое скольжение в системе блоков также обладает всеми признаками автоколебаний [Кузьмин, 2012].

В некоторых работах показано, что диссипативные твердотельные структуры, саморганизующиеся в отдельных системах, являются фрактальными [Смирнов, 1993; Зосимов, Лямшев, 1995]. Такие системы представляют собой новый тип структурного поведения и состояние вещества, характеризующегося существенным изменением их физических свойств.

В столь сложноструктурированной реальной геологической среде существуют комплексы нелинейных взаимодействий между физическими полями, структурами и подсистемами [Николаев, 2002; Геншафт, 2009]. Академик О. В. Руденко указывает, что следует различать три типа нелинейности: геометрическую, физическую и структурную, каждая из которых может быть распределена в объеме среды или сосредоточена в некоторой части ее объема. Важный пример сред с большой структурной нелинейностью — трещиноватые среды, в которых, как указал Робсман, нелинейные свойства усиливаются с ростом числа трещин [Руденко, 2006].

Как сейсмическая, так и электромагнитная эмиссии обладают ярко выраженными свойствами нелинейных процессов, способностью к периодической самоорганизации и хаотизации, характерным поведением при приближении к катастрофе (землетрясению). Показано, что чем ближе к бифуркации стационарного режима системы, тем больше в ее спектре вклад низкочастотных шумов — (мягких) мод [Руманов, 2013]. Таким образом, основной задачей нелинейно-динамического подхода является выработка на основе экспериментальных данных, адекватных динамических образов важнейших явлений, происходящих в геологической среде, и построение на их основе базовых моделей и динамических механизмов ее поведения. Эти механизмы особенно важны

для разработки прогноза сейсмической обстановки в исследуемом регионе.

Разумеется, было бы нереально комментировать здесь весь спектр высказанных по этому поводу точек зрения. Весьма вероятно, однако, что нелинейно-динамический подход и детерминированный хаос дают новое видение рассматриваемой проблемы. На этой основе уже предложены и реализованы новые методы геодинамических исследований, в частности методы эмиссионной сейсмической томографии и метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли [Шуман и др., 2012].

По нашему мнению, в настоящее время следует обратить особое внимание на Крым и Северный Кавказ, где существующие сейсмические опасности и наведенные техногенные катастрофы могут нанести значительный ущерб экономике Украины и России как в региональном, так и в общегосударственных масштабах. И в этой связи, сделав краткий анализ самих истоков затронутой проблемы, которая в настоящее время активно изучается, обратимся к рассмотрению аномальных магнитных возмущений, наведенных сейсмическими событиями, которые произошли в районе Черноморского шельфа на некотором удалении от границ Большого Сочи. При проведении детальных мониторинговых наблюдений получаемые в этом регионе экспериментальные данные могут стать востребованными при составлении прогнозов катастрофических сейсмических событий уже в недалеком будущем.

Сейсмичность Большого Сочи. Рассмотрим одно из трех заметных сейсмических событий (см. рис. 8), которые произошли одно за другим на шельфе Черного моря в районе «Большое Сочи—Сухуми» в декабре 2012 г. Сопоставительный сейсмологический анализ результатов наблюдений показал, что все три землетрясения развивались по одинаковым сценариям.

Итак, сетью сейсмических станций Геофизической службы РАН и аппаратурными комплексами Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН 25 декабря 2012 г. в 22:44:32 было зафиксировано землетрясение в районе Большого Сочи. Координаты эпицентра: N 42,56°; E 40,89°; глубина 10 км; магнитуда 5,4.

Сейсмические волновые формы этого землетрясения, полученные на сейсмостанции «Нейтрино» Северо-Кавказской геофизической обсерватории (рис. 9), в полной мере отражают

периоды подготовки и развития анализируемого сейсмического события. Зафиксированные волновые формы аномальных магнитных возмущений, предвещающих это сейсмическое событие, приведены на рис. 10 и 11.

Некоторые из приводимых волновых форм были получены на сейсмостанции «Алушта» (здесь в 2012 г. по согласованию с Национальной академией наук Украины российскими учеными была установлена магнитовариационная станция ИЗМИРАН) и в лабораториях Северо-Кавказской геофизической обсерватории. Соответствующая информация отражена в подрисуночных пояснениях.

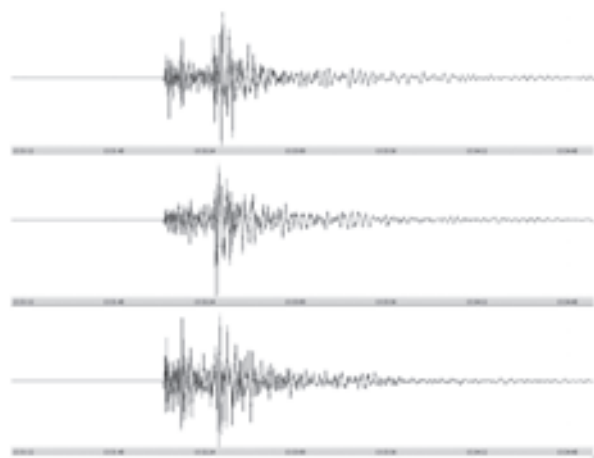


Рис. 9. Трехкомпонентная запись землетрясения 25.12.2012 г. по данным сейсмостанции «Нейтрино» ГС РАН, размещенной в лаборатории № 2 (расстояние от эпицентра 160 км).

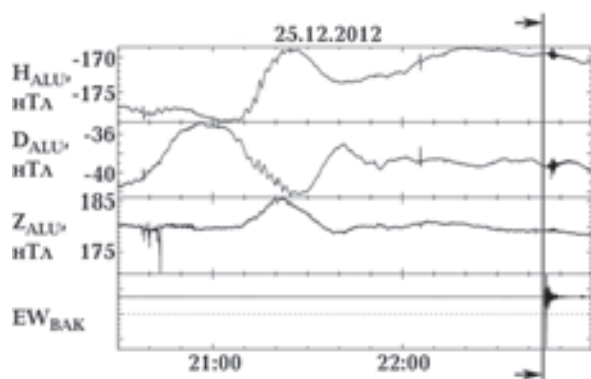


Рис. 10. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. (время в очаге отмечено вертикальной линией). ALUD, ALUH, ALUZ — вариации компонент магнитного поля Земли в пункте «Алушта»; ВАКЕW5 — вариации наклонов в лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории.

При анализе этих экспериментальных данных в качестве опорного сейсмического сигнала приняты данные наклономеров лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории. В дальнейшем эти данные были скорректированы по показаниям магнитных вариометров, кварцевая измерительная система которых всегда реагирует на смещения постаumenta при сильном сейсмическом ударе (рис. 12). Вертикальная линия на всех графиках отражает время в очаге.

Отметим, что все магнитовариационные станции, входящие в состав Северо-Кавказ-

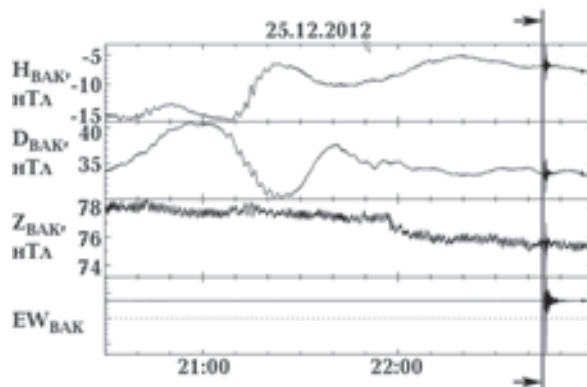


Рис. 11. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. (22:44:32.1). Данные магнитовариационной станции, установленной в лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории: H_{BAK} , D_{BAK} , Z_{BAK} — вариации магнитного поля Земли, EW_{BAK} — показания накломера.

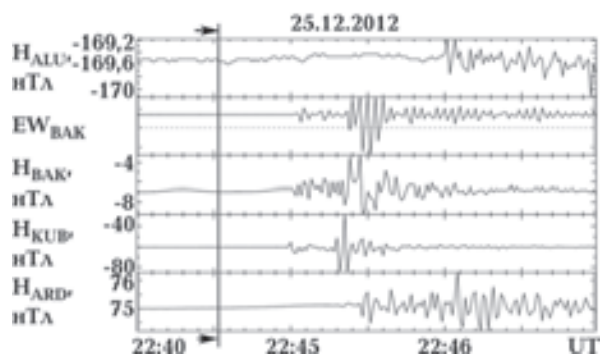


Рис. 12. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Магнитные возмущения — это реакция измерительной кварцевой системы магнитного вариометра на сейсмический удар «ближнего» землетрясения: H_{ALU} — магнитовариационная станция на пункте «Алушта»; EW_{BAK} и H_{BAK} — показания наклономеров и магнитовариационной станции по данным лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории; H_{KUB} — вариации H-компоненты магнитного поля, Верхнекубанский полигон; H_{ARD} — показания магнитовариационной станции на пункте «Ардон». Структура зафиксированных возмущений на всех станциях отражает отличительные частотные характеристики бетонных постаментов.

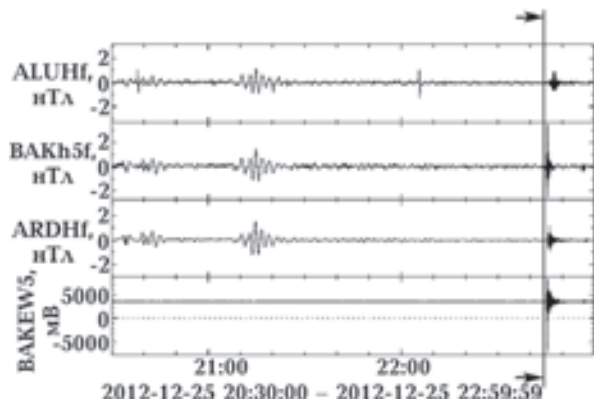


Рис. 13. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Структура характерных аномальных магнитных возмущений, зарегистрированная за два часа до начала анализируемого сейсмического события: Н-компонента магнитного поля после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц на: станции «Алушта» — $ALUH_f$, на станции лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории — $BAKh5_f$ и пункте «Ардон» — $ARDH_f$, $BAKEW5$ — показания наклономеров по данным лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории.

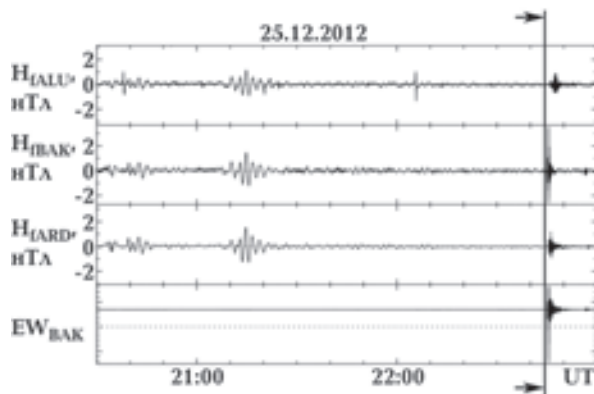


Рис. 14. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Структура характерных аномальных магнитных возмущений, зарегистрированная за два часа до начала анализируемого сейсмического события. Вариации Н-компоненты магнитного поля после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц на станции «Алушта» — H_{fALU} , по данным лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории — H_{fBAK} и на пункте «Ардон» — H_{fARD} ; EW_{BAK} — показания наклономеров (Северо-Кавказская геофизическая обсерватория, лаборатория № 2).

ской обсерватории, и отдельные пункты магнитовариационных наблюдений, расположенные в субавроральной зоне, зафиксировали аномальные магнитные возмущения, предвещающие анализируемое сейсмическое событие. Отчетливые волновые формы в субавроральной зоне были зафиксированы по каналам D и H магнитных вариометров; канал Z в этот

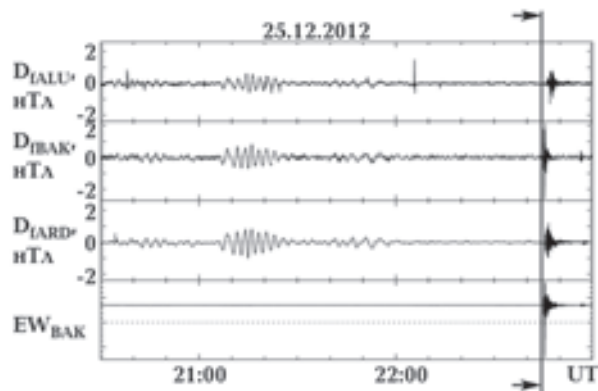


Рис. 15. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Сопоставление данных трех разнесенных магнитовариационных станций: вариации D-компоненты магнитного поля после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц на магнитовариационной станции «Алушта» — D_{fALU} , на станции лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории — D_{fBAK} и на станции «Ардон» — D_{fARD} ; EW_{BAK} — показания накломера (Северо-Кавказская геофизическая обсерватория, лаборатория № 2).

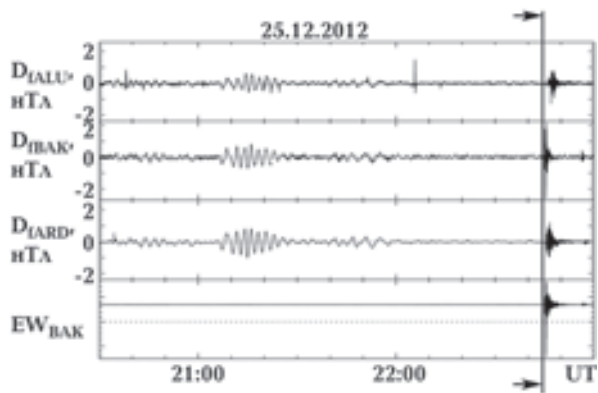


Рис. 16. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Сопоставление показаний трех разнесенных магнитовариационных станций: вариации D-компоненты магнитного поля после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц на магнитовариационной станции «Алушта» — D_{fALU} , на станции лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории — D_{fBAK} и на станции «Ардон» — D_{fARD} ; EW_{BAK} — показания накломера (Северо-Кавказская геофизическая обсерватория, лаборатория № 2).

период практически не функционировал по техническим причинам.

Сигналы, зафиксированные по каналу Z магнитовариационной станции лаборатории № 2 Северо-Кавказской геофизической обсерватории (см. рис. 10) зашумлены. Это объясняется сбоем в настройке чувствительной системы вертикального измерительного тракта (при механическом воздействии сейсмического удара по постаменту) на этапе записи сейсмического события в районе Сочи—Сухуми.

Однако и в этом случае удалось выделить аномальное магнитное возмущение, наведенное в зоне подготовки землетрясения, которое произошло под морским дном.

На рис. 13—16 приведены волновые формы магнитных возмущений, полученные в результате фильтрации первичной геомагнитной информации с частотой среза 0,003 Гц. Здесь использованы показания магнитных вариометров нескольких лабораторий Северо-Кавказской геофизической обсерватории.

Отметим, что характерные волновые пакеты, по своей структуре напоминающие сигналы на выходе «резонансного колебательного контура», отражают сложные электродинамические процессы, которые происходят в объеме зоны подготовки землетрясения на всех этапах его развития.

Тонкая структура характерных аномальных магнитных возмущений, зарегистрированная за два часа до начала анализируемого сейсмического события, приведена на рис. 13, а на рис. 14 приведены сопоставительные данные, которые были получены с использованием магнитных вариометров, установленных на трех разнесенных сейсмических станциях Северо-Кавказской геофизической обсерватории. Они расположены в различных районах Европейской части России и Украины.

Сопоставление экспериментальных наблюдений позволяет отметить одну особенность в структуре анализируемых сигналов. Она заключается в том, что фазы аномальных магнитных возмущений, зафиксированные идентичными магнитовариационными станциями, расположенными в разных районах

европейской части России и в Крыму, не несут четкой информации о направлении на источник. Полученный результат указывает на то, что аномальные магнитные возмущения на этих расстояниях еще не сформированы полностью. А это значит, что информация о месте положения источника аномальных возмущений может быть получена только при условии, если будет создана технология обработки весьма неустойчивой фазовой структуры изучаемых аномальных магнитных сигналов.

Другой результат следует из анализа и сопоставления записей наведенных аномальных магнитных возмущений, полученных в лабораториях Северо-Кавказской геофизической обсерватории и в субавроральной зоне (рис. 17, 18).

Приведенные здесь экспериментальные результаты убеждают нас как в подобии фазовой структуры, так и в том, что максимальная амплитуда аномального магнитного возмущения в Карпогорах (субавроральная область), составляющая в среднем величину 3,0—5,0 нТл, в других районах (Кавказ, Крым) имеет величину 1,0—2,0 нТл, т. е. меньше примерно в три-четыре раза.

На рис. 19 и 20 показано сопоставление тонкой структуры аномальных магнитных возмущений, полученных в результате фильтрации первичных сигналов с частотой среза 0,003 Гц D- и H-компонент магнитного поля после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц на станции «Алушта», Северо-Кавказской геофизической обсерватории (лаборатория № 2) и станции «Ардон».

В настоящее время полученные экспериментальные результаты строгого теоретиче-

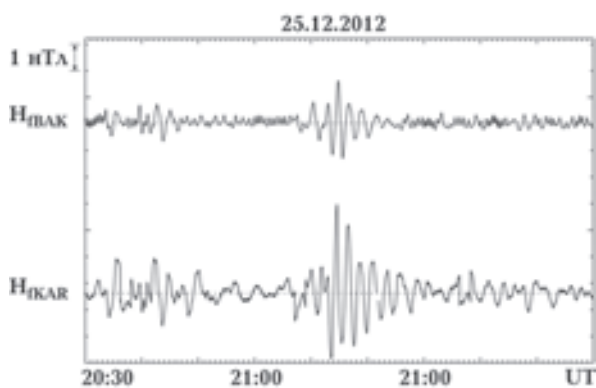


Рис. 17. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Аномальные магнитные возмущения: вариации H-компоненты магнитного поля после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц по данным Северо-Кавказской геофизической обсерватории, лаборатория № 2 — $H_{ИВАК}$ и научного стационара «Карпогоры» — $H_{ИКАР}$.

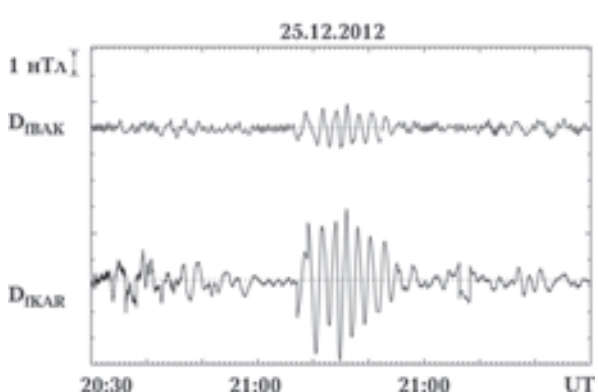


Рис. 18. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Аномальные магнитные возмущения: вариации D-компоненты магнитного поля после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц по данным Северо-Кавказской геофизической обсерватории (лаборатория № 2) — $D_{ИВАК}$ и научного стационара «Карпогоры» — $D_{ИКАР}$.

ского обоснования пока не получили. Можно только прогнозировать, что источник обнаруженного эффекта, связанного с усилением возмущения в субавроральной зоне, следует искать в ионосфере.

Известно, что систему поверхность Земли—атмосфера—ионосфера—магнитосфера можно рассматривать как некоторую глобальную систему резонансного типа. Ее отдельные образования способны возбуждаться при воздействии колебательных или импульсных движений, вызванных процессами в литосфере, на земной поверхности, атмосферными потоками, грозовой деятельностью, наведенными электромагнитными возмущениями и т.п.

Охватить все возможные взаимодействия сегодня затруднительно да и, по-видимому, в этом нет пока острой необходимости. Следует только помнить, что все эти взаимосвязи носят скорее аномальный характер, поскольку проявляются, как правило, в экстремальных условиях, при наличии каких-либо значительных отклонений от стационарного состояния.

Готовящееся землетрясение как раз и представляет собой источник аномальных возмущений, на которые должна реагировать ионосфера. Механизмы акустического и электромагнитного взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы при землетрясениях, мощных взрывах, извержениях вулканов, цунами, торнадо и прочих аномальных геофизических явлениях сегодня активно изучаются, однако они еще далеки от полного понимания [Гохберг, Шалимов, 2008].

Приведенные данные натурных наблюдений подтверждает вывод, сделанный авторами ранее, о том, что появлению аномальных магнитных возмущений на этапе подготовки и развития масштабных сейсмических событий способствуют в первую очередь литосферные деформации флюидонасыщенных разломно-блоковых структур, вызывающие трансформацию сформировавшихся наэлектризованных дилатантных образований [Собисевич и др., 2009; Собисевич, 2012]. При этом разделение зарядов и появление наведенных магнитных возмущений происходит спонтанно в отдельных объемах напряженно-деформируемой геологической среды, ответственной за подготовку (созревание) сейсмической катастрофы в целом [Adushkin, Soloviev, 1996].

Остается открытым вопрос, почему в момент, следующий за первым ударом, аномальные магнитные возмущения в ряде случаев малы или практически отсутствуют, а в других

процесс генерации продолжается?

Обнаруженное явление следует связывать с электродинамическими процессами в геологических структурах на этапах «созревания» сейсмического процесса в очаговой зоне. Именно в этот период завершается развитие многих взаимодействующих электростатических образований геологической среды дилатантного типа и происходит локализация деформирования в узкую полосу сдвига. В момент удара заканчивается разделение зарядов и процессов разрядки, определяющих генерацию магнитных возмущений; дилатансионная множественная трещиноватость исчезает и начинается разгрузка трансформированного упругого объема – упругая отдача сжатой области.

Однако при сильных катастрофических событиях, выделяющихся аномальными условиями формирования эпицентральной зоны, удается наблюдать магнитное «дыхание» очага как на начальных этапах подготовки землетрясения, так и в процессе его развития вплоть до окончания сейсмического процесса.

Показательным примером в этом случае является землетрясение в районе острова Санта-Крус, которое произошло 6 февраля 2013 г. в 01:12:22.4; координаты события S 10,55°, E 165,09°, глубина 10 км, магнитуда 7,2. При этом событии удары и сопутствующие деформационные процессы практически наблюдались непрерывно в течение суток. В качестве примера на рис. 21 приведен фрагмент его записи, отражающий факт наличия наведенных аномальных магнитных возмущений, начиная за час до первого удара и продолжавшихся на всех этапах развития сейсмического процесса.

Приведенный пример является ярким подтверждением того факта, что аномальные возмущения в вариациях магнитного поля Земли перед готовящимися землетрясениями генерируются как в районе эпицентральной зоны, так и в прилегающих объемах геологической среды.

На основе обобщающего анализа ряда определяющих теоретических и экспериментальных работ профессор В. Н. Николаевский делает важный вывод о том, что выход на анизотропную трещиноватость массива, которая характерна для локализации случайно распределенных отдельностей в условиях трансформации дилатансионно возникших ограниченных геологических структур в зоне подготовки землетрясения, определяет спектр важнейших краткосрочных предвестников [Николаевский, 2011].

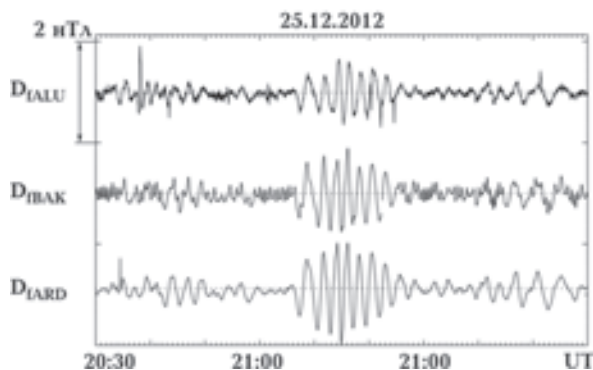


Рис. 19. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Сопоставление тонкой структуры аномальных магнитных возмущений, полученных в результате фильтрации вариации D-компоненты магнитного поля с частотой среза 0,003 Гц по данным станции «Алушта» — D_{IALU} , Северо-Кавказской геофизической обсерватории (лаборатория № 2) — D_{IBAK} и станции «Ардон» после фильтрации с частотой среза 3,33 мГц — D_{IARD} .

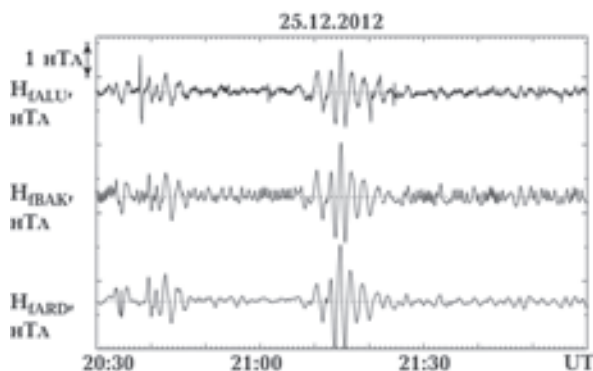


Рис. 20. Землетрясение в районе Сочи — Сухуми 25.12.2012 г. Тонкая структура аномального магнитного возмущения после фильтрации с частотой среза 0,003 Гц; вариации H-компоненты магнитного поля по данным магнитовариационной станции «Алушта» — H_{IALU} , Северо-Кавказской геофизической обсерватории (лаборатория № 2) — H_{IBAK} и станции «Ардон» — H_{IARD} .

Выводы. Инструментальные наблюдения геодинамических, геомагнитных и других геолого-геофизических процессов в литосфере Северного Кавказа отражают геофизические возмущения, связанные с сейсмическими событиями в регионе, лаборатории Северо-Кавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН и ВСЕГИНГЕО. Магнитовариационные станции в Алуште и Карпогорах ведут мониторинг разномасштабных аномальных магнитных возмущений. Получаемые экспериментальные данные подтверждают наличие аномальной геомагнитной активности в районе Большого Сочи. В статье предпринята попытка теоретического объяснения наблюдаемых

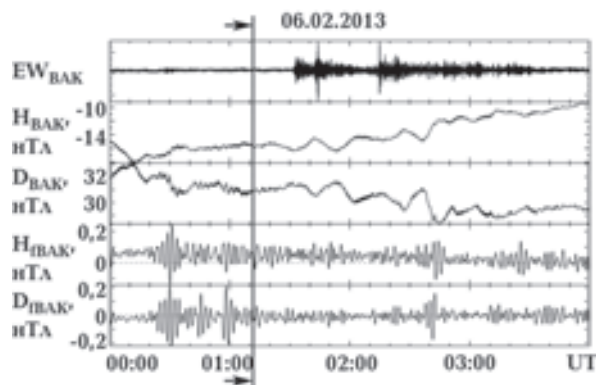


Рис. 21. Землетрясение в районе острова Санта-Крус 6.02.2013 г. Развитие аномальных магнитных возмущений на всех этапах развития этого сейсмического события: H_{IBAK} , D_{IBAK} — вариации магнитного поля Земли на компонентах H и D, после высокочастотной фильтрации с частотой среза 0,003 Гц, по данным Северо-Кавказской геофизической обсерватории (лаборатория № 2); EW_{IBAK} — показания наклономера на этой же станции.

эффектов и предлагаются рекомендации по их практическому применению.

Геодинамические процессы и связанные с ними спонтанные события внутри эпицентральной зоны сложны и пока не поддаются детальному теоретическому объяснению, но в их тонкой структуре удается выделить источники наблюдаемых экспериментально аномальных магнитных возмущений. Однако достаточных оснований выходить на краткосрочный прогноз сильных сейсмических событий в сейсмоопасном Крымско-Черноморском регионе пока нет, так как полученные результаты не дают ответа на вопросы о масштабах и точных координатах очага [Собисевич и др., 2009; Собисевич, 2010, 2012].

Строгий теоретический расчет сейсмических и электромагнитных полей, обусловленных движениями распределенных в пространстве разломно-блоковых структур дилатансного типа, составляющих в целом единую колебательную систему, — задача трудная и не всегда выполнимая. Даже когда такой расчет и возможен, его результат вряд ли стоит затраченных усилий. Небольшие изменения распределения амплитуды на поверхности отдельного излучающего элемента, незначительные отклонения свойств отдельностей геологической среды и многие другие детали — все это может приводить к большим погрешностям. Однако в процессе проведения теоретических исследований иногда можно обойтись приближенными расчетами на основе нескольких известных важнейших характеристик источников. При-

ближенные решения часто оказываются достаточно простыми и практически столь же точными, как и математически строгие решения.

При изучении аномальных УНЧ магнитных возмущений следует учитывать и тот факт, что, рождаясь в очаге, эти импульсные электромагнитные поля УНЧ диапазона окончательно формируются в структуре литосфера—атмосфера—ионосфера—магнитосфера. В ряде случаев они могут также эффективно возбуждаться и при контролируемом (искусственном) воздействии на геофизические структуры. В этом смысле целенаправленный полевой эксперимент приобретает, быть может, определяющее значение.

В следующей публикации авторы постараются более глубоко проанализировать основные геофизические процессы, которые могут быть использованы в будущем при решении проблемы прогноза сильных сейсмических событий как на суше, так и в океане.

Благодарности. Авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность академикам РАН Н. П. Лаверову и А. О. Глико, которые уделяют постоянное внимание развитию фундаментальных научных исследований в рамках российско-украинского проекта, а также профессору В. Н. Николаевскому за обсуждение результатов наблюдений.

Список литературы

- Бахмутов В. Г., Сегова Ф. И., Мозговая Т. А. Морфологические признаки в структуре геомагнитных вариаций в период подготовки сильнейшего землетрясения 25 марта 1998 г. в Антарктиде // Укр. антаркт. журн. — 2003. — № 1. — С. 54—60.
- Геншафт Ю. С. Земля — открытая система: геологические и геофизические следствия // Физика Земли. — 2009. — № 8. — С. 4—12.
- Глинский Б. М., Ивакин А. Н., Ковалевский В. В., Левшенко В. Т., Руденко О. В., Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е. Изучение сейсмомагнитных эффектов, возникающих при вибровоздействии на среду // Развитие методов и средств экспериментальной геофизики. Вып. 2. — Москва: ОИФЗ РАН, 1996. — С. 226—235.
- Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л., Гершензон Н. И., Пилипенко В. А. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1985. — № 1. — С. 72—87.
- Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмозлектромагнитные явления. — Москва: Наука, 1988. — 174 с.
- Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. — Москва: Наука, 2008. — 295 с.
- Гульельми А. В. Гидромагнитная диагностика и геоэлектрическая разведка // Успехи физ. наук. — 1989. — **158**, вып. 4. — С. 605—637.
- Гульельми А. В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физ. наук. — 2007. — **177**, № 12. — С. 1250—1276.
- Двойченко П. А. Черноморское землетрясение 1927 года в Крыму // Черноморские землетрясения 1927 года и судьбы Крыма. — Симферополь: Крымгосиздат, 1928. — С. 77—99.
- Зосимов В. В., Лямшев А. М. Фракталы в волновых

Основания для проведения работ. Исследования проведены в рамках российско-украинского проекта «Экстремальные геофизические процессы и техногенные катастрофы: поиск путей снижения негативных последствий на основе анализа результатов мониторинга геофизических полей, новых данных о строении и геодинамике геологической среды, прогнозирование опасности от землетрясений и других угрожающих явлений эндогенного происхождения на территории Украины и России».

- Основанием для проведения работ явились:
- распоряжение Президиума НАН Украины от 13.03.2012 г. № 149;
 - решение Совета Программы фундаментальных исследований № 4 Президиума РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 гг. (государственный контракт № 14.515.11.0099 от 16 октября 2013 г.)» и Международного Российско-Украинского проекта, выполняемого в рамках Программы №4 фундаментальных исследований Президиума РАН.

- процессах // Успехи физ. наук. — 1995. — **165**, № 4. — С. 361—401.
- Иванов А. Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн // Докл. АН СССР. — 1939. — **24**, № 1. — С. 41—43.
- Иванов А. Г. Сейсмoeлектрический эффект второго рода // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. — 1940. — № 4. — С. 699—726.
- Куксенко В. С., Килькеев Р. Ш., Мирошниченко М. И. К интерпретации электрических предвестников землетрясений // Докл. АН. — 1981. — **260**, № 4. — С. 841—843.
- Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4,0$ ($K \geq 11,0$) с древнейших времен по 2000 г. / Сост. А. А. Годзиковской. — 2001. — <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/ser/caucasus/camapru.html>
- Кузьмин Ю. О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. — 2012. — № 1. — С. 3—19.
- Левшенко В. Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореф. дис... д-ра физ.-мат. наук. — Москва: ОИФЗ РАН, 1995. — 36 с.
- Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. М. Ионосферные предвестники землетрясений. — Москва: Наука, 1992. — 304 с.
- Лукк А. А., Дещеревский А. В., Сигорин А. Я., Сигорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. — Москва: ОИФЗ РАН, 1996. — 210 с.
- Моргунов В. А., Матвеев И. В., Степанов А. В. Электричество атмосферы в зоне тектонического разлома // Магнитосферные исследования. — Москва: Наука, 1990. — № 15. — С. 65—68.
- Николаев А. В. Развитие методов нелинейной геофизики // Вестник ОГГГН РАН. — 2002. — № 1(20). — С. 34—38.
- Николаевский В. Н. Обзор: Земная кора, дилатансия и землетрясения. — Москва: Мир, 1982. — С. 133—202.
- Николаевский В. Н. Очаг землетрясения — события и предвестники удара // Собрание трудов. Экстремальные природные процессы и катастрофы. — Москва: ИФЗ РАН, 2011. — Т. 2. — С. 316—322.
- Николаевский В. Н. Собрание трудов. Геомеханика. Т. 1. Разрушение и дилатансия. Нефть и газ. — Ижевск: Изд. Ин-та компьютер. технологий, 2010. — 640 с.
- Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. Т. Механика насыщенных пористых сред. — Москва: Недра. 1970. — С. 335.
- Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // Успехи физ. наук. — 2006. — **176**, № 1. — С. 77—95.
- Руманов Э. Н. Критические явления вдали от равновесия // Успехи физ. наук. — 2013. — **183**, № 1. — С. 103—112.
- Сигорин А. Я. Предвестники землетрясений. — Москва: Наука. 1992. — 168 с.
- Смирнов Б. М. Излучательные процессы с участием фрактальных структур // Успехи физ. наук. — 1993. — **163**, № 7. — С. 50—63.
- Собисевич А. Л. Избранные задачи математической геофизики и вулканологии. — Москва: ИФЗ РАН, 2010. — 464 с.
- Собисевич А. Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. — Москва: ИФЗ РАН, 2012. — 510 с.
- Собисевич А. Л., Григнев Д. Г., Собисевич Л. Е., Канониги К. Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // Сейсм. приборы. — 2008а. — **44**. — С. 12—25.
- Собисевич Л. Е., Канониги К. Х., Собисевич А. Л. Изучение ультранизкочастотных электромагнитных возмущений, регистрируемых в районе Эльбрусского вулканического центра // Изменения природной среды и климата. Природные катастрофы. Ч. 1 / Под ред. Н. П. Лаврова. — Москва: ИФА РАН, 2008б. — Т. 6. — С. 157—163.
- Собисевич Л. Е., Канониги К. Х., Собисевич А. Л. Наблюдения УНЧ геомагнитных возмущений, отражающих процессы подготовки и развития цунамигенных землетрясений // Докл. АН. Геофизика. — 2010. — **435**, № 4. — С. 548—553.
- Собисевич Л. Е., Канониги К. Х., Собисевич А. Л. Ультранизкочастотные электромагнитные возмущения, возникающие перед сильными сейсмическими событиями // Докл. АН. Геофизика. — 2009. — **429**, № 5. — С. 688—672.
- Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Канониги К. Х. Аномальные геомагнитные возмущения, наведенные катастрофическими цунамигенными землетрясениями в районе Индонезии // Геофиз. журн. — 2012. — **34**, № 5. — С. 22—37.
- Спитакское землетрясение (1988 г.) // Катастрофы конца XX века / Под ред. В. А. Владимирова. — Москва: Издат. группа URSS, 1998. — 400 с.

- Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве // Изв. АН СССР. Сер. географ. и геофиз. — 1944. — **8**, № 4. — С. 133—150.
- Шуман В. Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмоэлектромагнитный шум литосферы // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 6. — С. 101—118.
- Шуман В. Н. Обобщенное уравнение генерации спонтанной электромагнитной эмиссии во фрактальной среде // Геофиз. журн. — 2013. — **35**, № 3. — С. 46—53.
- Шуман В. Н. Электромагнитная эмиссия литосферы: всегда ли мы адекватно трактуем то, о чем как будто знаем? // Геофиз. журн. — 2012. — **34**, № 2. — С. 4—19.
- Шуман В. Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофиз. журн. — 2007. — **29**, № 2. — С. 3—16.
- Шуман В. Н., Коболов В. П., Старостенко В. И., Буркинский И. Б., Лойко Н. П., Захаров И. Г., Яцюма Д. А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, элементы теории, полевой эксперимент // Геофиз. журн. — 2012. — **34**, № 4. — С. 40—61.
- Adushkin V. V., Soloviev S. P. Generation of low-frequency electric fields by explosion crater formation // J. Geophys. Res. — 1996. — P. 62—71.
- Fraser-Smith A. C. Ultralow-Frequency Magnetic Fields Preceding Large Earthquakes // EOS. — 2008. — **89**, № 23. — 211 p.
- Moore G. W. Magnetic Disturbances Preceding the 1964 Alaska Earthquake // Nature. — 1964. — **203**. — P. 508—509.
- Pat. № 2054067 USA. Method and apparatus for seismic electric prospecting / L. W. Blau, L. Statham. Publ. 1936. — <http://www.archpatent.com/patents/2054067>.
- Sobisevich L. E., Kanonidi K. Kh., Sobisevich A. L. Ultra-Low-Frequency electromagnetic variations observed prior to development of an earthquake followed by tsunamis // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 4. — С. 152—157.