

УДК 550.834.05:551.243

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ММЗ
НА РАЗРЕЗАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА
И АНАЛИЗ ГЛУБИННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

© Заалишвили В.Б., Чотчаев Х.О.

Геофизический институт ВНЦ РАН, г. Владикавказ

В статье рассмотрен комплексный анализ геологических данных на основе использования скоростной модели метода микросейсмического зондирования (ММЗ) на глубинных разрезах Центральной части Большого Кавказа. При этом на основе анализа полученных результатов показан высокий ресурс метода ММЗ в условиях современных тектонических процессов. Приведены геолого-геофизические данные, подтверждающие соответствие аномальных объектов на скоростной модели ММЗ глубинным структурам и тектоническим нарушениям. Сделан вывод, что использование ММЗ имеет хорошую перспективу. Оно может стать направлением инновационного развития не только при исследовании глубинных и нефтегазоносных структур, но и при поисках рудных месторождений через решение структурно-тектонических, литолого-морфологических признаков контроля рудопоявления и системное представление о факторах, обуславливающих формирование металлогенической специализации, геофизических полей и геологического строения металлогенических зон, рудных, полей и месторождений.

Ключевые слова: микросейсмическое зондирование, скоростные модели, высоко-, низкоскоростные объекты, тектонические зоны, разломы Ардонский, Тибский.

Перспективы использования метода микросейсмического зондирования (ММЗ)

Сложная геоморфологическая и тектоническая мозаика блоков Большого Кавказа, которая подвержена одновременным горизонтальным и вертикальным сдвигам различной амплитуды, без отчетливого понимания особенностей целостного строения глубинного геологического разреза не может быть полноценно объяснена в его современных тектонических движениях. Традиционно большой научный и прикладной интерес к глубинным исследованиям заключается в необходимости установления особенностей формирования и развития основных структур Большого Кавказа, в реконструкции геодинамической обстановки в коллизионной зоне, в определении морфологии кровли и подошвы консолидированной коры, обуславливающей создание современной глубинной модели Центрального Кавказа. Это позволяет установить наследственную пространственно-временную связь с приповерхностными тектоническими блоками, металлогеническими зонами, рудными узлами и рудоконтролирующими структурами тектонического характера более высоких порядков.

С целью решения этой важнейшей задачи необходимо установление глубинных особенностей верхней части кристаллического фундамента, полноценное исследование которого традиционно реализуется путем применения весьма дорогих систем современных сейсморазведочных средств и сложных методик: глубинные сейсмические зондирование и профилирование (ГСЗ и ГСП) и метод обменных волн землетрясений (МОВЗ). Другие методические оправданные полевые подходы, использующие такие альтернативные физические поля, как «гравиметрия», «магнитометрия», «электромагнитные поля»: в виде методов теллурического профилирования и зондирования, частотного зондирования и т.д., как правило, малопродуктивны и неточны в высокогорных условиях, обусловленные сложностью применения и учета здесь необходимых данных гипсометрических измерений. Кроме того, использование соответствующих аппаратных комплексов таких методов, нередко, дорого и недоступно рядовым научным и научно-производственным организациям. Добавим, что в условиях современной политической ситуации, реализация традиционных полевых исследований связана с опасностью неоправданной утраты ВВ.

В подобных условиях применение методов сейсмической разведки, которая основана на прямом сопоставлении спектрального состава микросейсм, заметно повышает оперативность, мобильность и доступность получения важнейших результатов полевых исследований, значительно снижая затраты на решение глубинных задач. Проявление резонансных явлений в том или ином физическом объекте, как отклик на излучающий стандартный частотный сигнал, характерный исключительно физическим параметрам данного тела (размеры, плотность, упругие свойства и т.д.), широко используется в инженерной сейсмологии для обоснованного дифференцирования видов и типов грунтов, при изысканиях нефтяных и водных ресурсов и т.д.

Особенности амплитудно-частотных характеристик месторождений руды, обусловленных конкретным литологическим составом, включающего слоистость разреза, его тип, глубину залегания, трещиноватость, водонасыщенность и т.д., определяют индивидуальные показатели рудного тела, которые позволят дифференцировать те или иные геологические объекты путем широкого использования в качестве зондирующего или облучающего сигнала, микросейсм Земли.

Собственно микросейсм в данном пункте инструментального наблюдения представляет собой суперпозицию колебаний, генерируемых различными природными процессами (локальные и удаленные землетрясения, поверхностные волны, колебания, обусловленные земными приливами и т.д.), и техногенными процессами (движущийся транспорт, работа различных механизмов). Применение ММЗ в целях установления особенностей глубинных структур, обусловлено наличием широкополосного диапазона микросейсм, приуроченных прихотливым образом, к неравномерности распределения интенсивности по частоте колебаний [Любушин, 2008].

Такой физический параметр, как сейсмический шум используется при сейсмическом микрорайонировании для таксономической дифференциации грунтов, и в сейсмологии при прогнозировании землетрясений. Параметр также используется для литологической дифференциации разреза коры Земли, установления глубинных (до 10 км) аномалий и выявления взаимосвязей с проявлением тектонического движения и оценкой геодинамического отклика геологической средой [Надежка и др., 2003].

Хорошо известное явление в виде проявления низкочастотных аномалий в спектральном составе микросейсм над природными коллекторами нефти и газа, обусловлено излучением соответствующих микросейсм насыщениями и поглощением или рассеянием высокочастотных составляющих спектра.

Признаком таких низкочастотных аномалий, позволяющим надежно дифференцировать от стохастических колебаний, можно отметить ее пространственную повторяемость, формирующей устойчивое образование. Это позволяет наблюдать целую серию подобных аномальных показателей.

Таким образом, применение исходных микросейсм и их аномалий позволяет рассматривать метод в виде вполне обоснованного инструментария для исследований глубинных структур. Особого внимания заслуживает проявление аномалий на активных тектонических нарушениях, позволяющих оценивать геодинамическую активность и эпицентральные зоны возможных сильных землетрясений [Спивак, Кишкина, 2004].

Согласно теоретическому обоснованию авторами ММЗ, физический механизм метода ими рассматривается в качестве полезного сигнала или некоего информативного параметра, который позволяет оценивать уровень искажения исходного сигнала той или иной неоднородностью в глубинном строении среды [Горбатиков и др., 2010]. На основе анализа особенностей распределения пространственного и частотного искажения на земной поверхности с той или иной достоверностью определяются форма и глубина залегания конкретной неоднородности, являющейся причиной этого проявления искажения. Имеется некоторая величина частоты колебаний в виде ее критического значения f , являющаяся частотой колебаний такой поверхностной волны Рэлея, искажения формы и амплитудно-частотной характеристики которой, определяются неоднородностью, расположенной на глубине H , и являются максимальными при сопоставлении с подобными искажениями неоднородностями, находящимися на других глубинах. Глубина проникновения волны Рэлея H определяется скоростью волны, $V_R(f)$ и частотой колебаний f с помощью известного выражения: $H \approx 0,4 \cdot V_R(f)/f$. Этот вывод, полученный теоретическими расчетами и доказанный экспериментальным путем известен достаточно давно. Использование ММЗ позволяет с помощью указанного выражения для частоты f определять глубины тех или иных неоднородностей, ответственных за определенные амплитудно-частотные искажения. Фазовая информация, к сожалению, не используется, хотя позволило бы, видимо, заметно расширить возможности метода, пусть и путем усложнения обработки и анализа данных.

Авторы компьютерной программы обработки данных ММЗ наблюдений на основе анализа результатов, проведенных ими численных экспериментов, пришли к выводу, что разрешающую возможность ММЗ при построении горизонтальной формы неоднородности определяется через $(0,25 - 0,3)\lambda$ (где λ – длина волны), а по вертикали – $(0,3 - 0,5)\lambda$ [Горбатиков, Цуканов, 2011]. Это означает, что посредством метода могут быть обнаружены неоднородности, горизонтальные и вертикальные размеры которых определяются соответствующей длиной волны, которая определяя глубину проникновения волны, показывает глубину ее залегания ($\lambda = V_R(f)/f$). Это означает, что значение основной моды микросейсмических колебаний, формирующей резонанс объекта, определяет пространственное расположение его по глубине.

Экспериментальные измерения методики реализуются путем накопления спектральной энергии сигнала микросейсм на некотором временном промежутке, который зависит от фона сейсмичности региона. Опыт показывает, что в регионах с активной геодинамикой период измерений может ограничиваться 2–3 часами.

Изучение амплитудных спектров колебаний создает условия для выделения интервалов, характеризующихся тремя уровнями шумов (малым, средним и сильным), анализ которых позволяет с помощью специального алгоритма давать количественные и качественные оценки выделенным объектам.

Исследования экспериментально-параметрических разрезов

Состояние изученности Центральной части Большого Кавказа - достаточно высокое и определяется уровнем технической оснащенности проведенных ранее глубинных исследований. Высокая плотность большого числа буровых скважин на предгорной и равнинной территориях и многочисленные выходы на дневную поверхность коренной породы, позволяют использовать их интервальность в качестве параметрических данных [Rogozhin et al., 2015]. В то же время, детальность и обоснованность глубинных особенностей Центрального Кавказа, определяющая уровень и проявление сейсмической опасности, все еще нуждается в развитии [Zaalishvili, Rogozhin, 2011]. Этому, к сожалению, способствовало прекращение с конца 80-х годов работ по принятой в 1972 г. Программе «Система регионального изучения коры и верхней мантии вдоль геотраверсов, проложенных через районы бурения глубоких и сверхглубоких скважин» [Козловский, 1982].

Сотрудники ГФИ ВНИЦ РАН провели полевые наблюдения высокоточными широкополосными сейсмоприемниками фирмы Lennartz Electronic GmbH ($T=20c$) на наиболее интересных разрезах региона, а полученные данные были в последующем обработаны методом ММЗ. Изучение глубинных особенностей тех или иных профильных направлений в принципе должны были проверить некоторые предположения и гипотезы.

В связи с тем, что границы административных территорий определяются пространственным расположением составляющих Большого Кавказа, то первый профиль, проходящий через Рокский тоннель, в качестве регионального профиля шел с севера сквозь Центральную часть Кавказа от сел. Эльхотово до г. Цхинвали, до юга вдоль федеральной автомобильной дороги «Кавказ». Расстояние между оконечностями измерений в пределах системы «Эльхотово-Цхинвали» составило всего 152 км (рис. 1). Исследования, в частности, могли определить характер сопряжения Южной микроплиты и Скифской континентальной плиты (поддвиг или надвиг).

Второй профиль располагался в пределах Балкаро-Дигорского тектонического поднятия или Садоно-Унальский горст, контролирующей все гидротермальные ресурсы региона. Профиль был ориентирован по широте и был расположен поперек возможного Ардонского глубинного разлома, который простирается субмеридионально [Zaalishvili et al., 2015; Shempelev et al., 2017].

Шаг наблюдений на обоих профилях составлял 500 м. В пределах данного профиля располагается целый ряд известных свинцово-цинковых месторождений (Верхний Згид, Садон, Джимидон).

На рисунке 2 показана скоростная модель геологического разреза вдоль профиля наблюдений «В.Згид – Джимидон». Здесь хорошо видны два объекта, отчетливо выделяющихся от окружающих горных пород. При этом вертикальные размеры обоих равновеликих аномалий значительно превышают их горизонтальные размеры. Низкоскоростной объект по горизонтали составляет 10–12 км и может отражать зону Ардонского глубинного разлома на данном участке. Вертикальный размах аномально выраженного объекта характеризуется протяженностью 17–18 км.

Граница объекта на западе расположена выше по течению (в 2,6 км) р. Садон от места впадения в р. Ардон, а граница структуры на востоке идет через село Нижний Унал. При этом поверхностный слой до глубины 4,5 км по сравнению с более глубинным слоем характеризуется большей неоднородностью и переработанностью тектоническими движениями. Между ветвями возможного Ардонского разлома на глубинах 4,5–5,3 км можно выделить реликт слабоизмененной высокоскоростной среды.

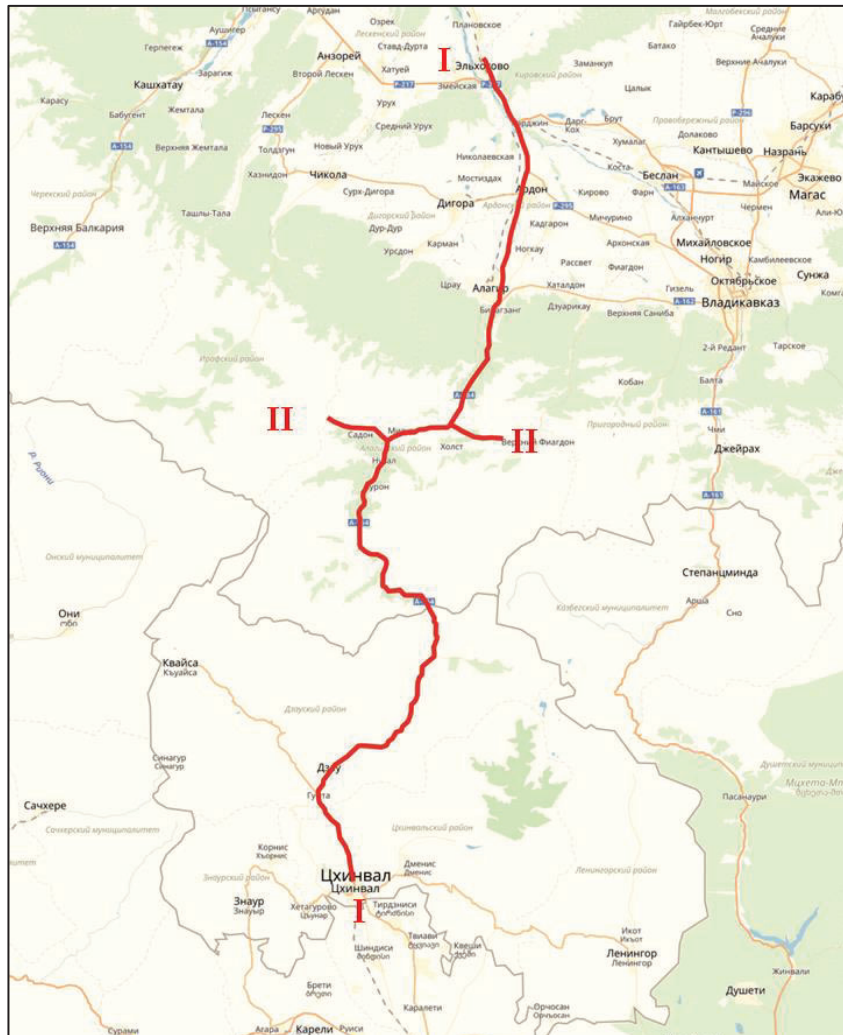


Рис. 1. Положение профиля ММЗ в плане:
 I—I профиль «Эльхотово — Цхинвали»; II—II — профиль В.Згид—Джимидон

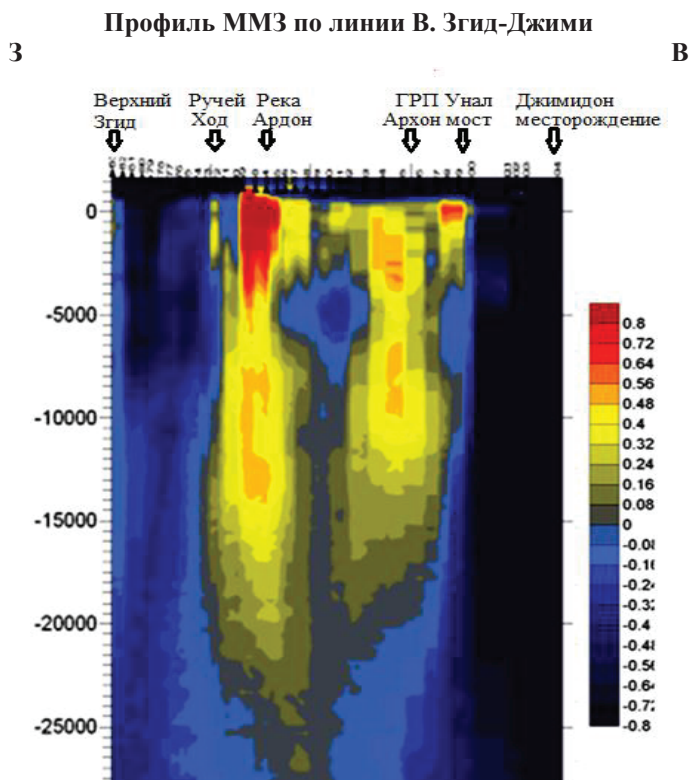
На рисунке 3 приводится скоростная модель разреза по выполненному профилю «Эльхотово-Цхинвали». Скоростная характеристика распределения неоднородностей достаточно достоверна в пределах глубин в ее южной части 30 км и в северной части - 50 км. Доверительный диапазон значений, нижеуказанных глубин, характеризуется меньшей надежностью. Участок тоннеля протяженностью 3730 м характеризуется в разрезе пропуском данных, обусловленным интенсивными помехами проходящим автотранспортом.

Совместный анализ скоростной модели вдоль профиля «Эльхотово – Цхинвали» (рис. 3) и тектонической карты региона позволяет сделать ряд выводов. Так, вход в среднескоростной слой при движении на юг (пикеты 108-119 и далее), включающий протяженность тоннеля, (пикет 122) выполнялся вдоль простираения однородного флиша, а пикеты 101–108 «проходили» в теле Тибского разлома мощностью около 3,0 км.

На скоростной модели отчетливо выделяется окрестности Адайком-Казбекского разлома (пикеты 134–141) отраженного в тектонических деформациях в глубину до 1,0 км, в то время, как в окрестностях Тибского разлома ослабленная конусообразная зона

доходит в глубину до 28 км. Есть предположение, что в пределах глубин 7–8 км в зоне Тибского разлома, простирается вязкий слой. Не исключено также крутое падение Тибского и Адайком-Казбекского разломов.

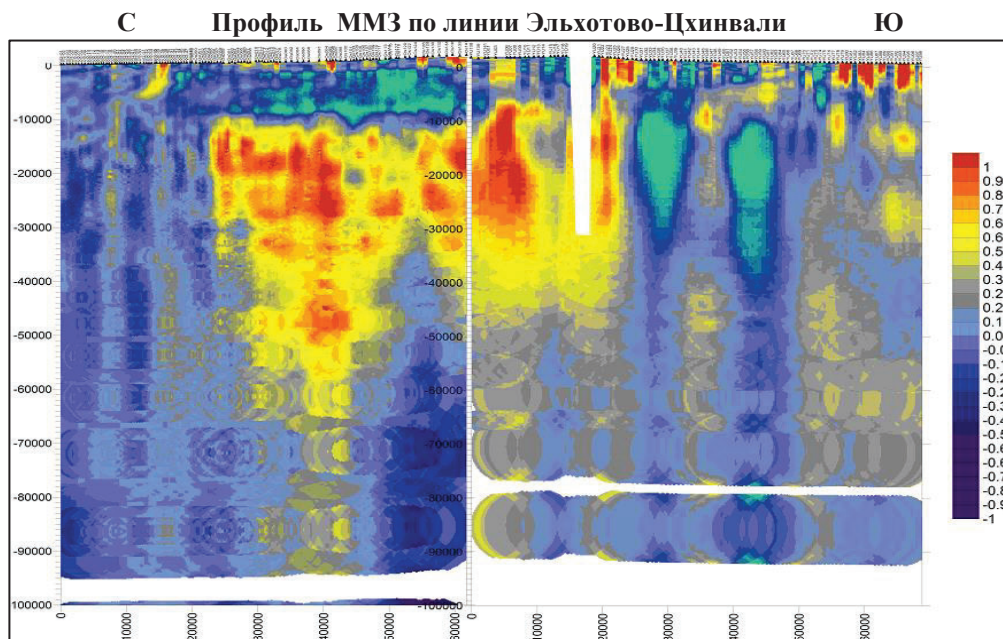
Отдельно на скоростной модели выделен высокоскоростной слой (пикеты 41–133), имеющий мощность около 8–10 км, описанный авторами достаточно детально [Горбатилов и др., 2015]. Необходимо отметить, что в привязке Главного надвига указанные авторы, на наш взгляд, допускают некоторую неточность. Главный надвиг (пикеты 124–128) на скоростной модели идентичен Адайком-Казбекской зоне. Видимо сложно поддержать утверждение [Горбатилов и др., 2010], что «над горизонтальной кровлей располагается высокоскоростной объем, выходящий к поверхности в виде гранитов, кристаллических и метаморфических сланцев Главного хребта». Дело в том, что данный район (пикеты 133–159) располагается на Южном склоне, сплошь сложенный флишем. На наш взгляд, вывод авторов указанной работы более соответствует высокоскоростному слою мощностью 8–10 км, расположенному севернее Адайком-Казбекского разлома и Главного надвига. Объект этот хорошо выделяется пространственно и расположен между г. Алагиром и Адайком-Казбекским разломом. Справедливости ради отметим, его продолжение неявным образом идет к Южному склону.



Шкала отклонений от сглаженной региональной скоростной модели V_{SR}

Рис. 2. Скоростная модель геологического разреза в интерпретации ММЗ

Высокоскоростной объект линейного размера проявляется от южной окраины Северо-Кавказского краевого прогиба (широта г. Алагир) и вмещает геологические структуры Дигоро-Осетинской зоны и зоны Главного Кавказского хребта (Касарская и Мкерская подзоны). Необходимо отметить низкоскоростной объект, подстилающий высокоскоростной слой, и сдвинутый к югу на 6 км относительно высокоскоростного объекта, уверенно проявляющийся до южной границы Тибского разлома.



Тоновая шкала отклонений от сглаженной модели региональной скорости V_{SR}

Рис. 3. Скоростная модель геологического разреза в интерпретации ММЗ

Заключение

Результаты активных исследований методом ММЗ стали основой формирования большого объема информации, позволившей путем совместного анализа с известными тектоническими, геоморфологическими и структурными материалами, установить надежные корреляционные взаимосвязи аномалий на скоростном разрезе модели с реальными геологическими структурами.

В результате изучения с помощью ММЗ по профилю «В. Згид – месторождение Джимидон» отчетливо выделен низкоскоростной слой поперечной протяженностью около 12,5 км и 15 км по вертикали, непосредственно увязываемый с предполагаемым Ардонским глубинным разломом, что является первым инструментальным подтверждением существованием аномальной неоднородности в пределах разлома.

На скоростной модели профиля «Эльхотово-Цхинвали» отчетливо выражен высокоскоростной горизонтальный слой мощностью 8-10 км простираем до 30км. Указанный слой подстилается низкоскоростным слоем протяженностью до 45 км, характеризующимся вертикальным размахом до 40 км. Проявление указанной структуры в скоростном разрезе Тибского разлома в виде основной тектонической структуры Адайком-Казбекской группы дают основание метод ММЗ отнести к современным структурно-картировочным инструментальным методам высокой эффективности.

Широкое применение метода ММЗ создаст условия для исключения необходимости использования сложных аппаратных средств и оборудования в сочетании с оперативностью, точностью и высокой повторяемостью и сделает метод незаменимым инструментарием в исследованиях важных геологических структур и изыскательских работ глубинных рудных месторождений.

Литература

1. Горбатилов А.В., Рогожин Е.А., Степанова М.Ю., Харазова Ю.В., Андреева Н.В., Передерин Ф.В., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Дзэбоев Б.А., Габараев А.Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в Осетинском секторе по комплексу геофизических данных // Физика Земли. – 2015. – №1. – С. 28–39.
2. Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Цуканов А.А., Тинакин О.В., Комаров А.Ю., Одинцов С.Л. Новая технология микросейсмического зондирования в задачах изучения глубинного строения месторождений нефти и газа // Нефтяное хозяйство. – 2010. – №6. – С. 15–17.
3. Горбатилов А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. – 2011. – №4. – С. 96–112.
4. Козловский Е.А. Комплексная программа глубинного изучения земных недр // Сов. геология. 1982. № 9. – С. 3–12.
5. Любушин А.А. Микросейсмический шум в минутном диапазоне периодов: свойства и возможные прогностические признаки // Физика Земли. – 2008. – №4. – С. 17–34.
6. Надежка Л.И., Орлов Р.А., Пивоваров С.П. и др. О связи параметров сейсмического шума с геологическими и геодинамическими особенностями Воронежского кристаллического массива // Вестн. Воронеж. ун-та. – Геология, 2003. – №2. – С. 179–185.
7. Спивак А.А., Кишкина С.Б. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. – 2004. – №7. – С. 35–49.
8. Rogozhin E.A., Gorbatikov A.V., Zaalishvili V.B., Stepanova M.Y., Andreeva N.V., Kharazova Y.V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus // Doklady Earth Sciences. 2015. T. 462. № 1. С. 543-545.
9. Shempelev, A.G., Zaalishvili, V.B., Kukhmazov, S.U. Deep structure of the western part of the Central Caucasus from geophysical data // Geotectonics, 2017 51(5), с. 479-488
10. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Nevskii L.N., Shempelev A.G. Geophysical fields above volcanic edifices in the north caucasus. Journal of Volcanology and Seismology. 2015. T. 9. № 5. С. 333-338.
11. Zaalishvili V.B., Rogozhin E.A. Assessment of seismic hazard of territory on basis of modern methods of detailed zoning and seismic microzonation // Open Construction and Building Technology Journal. 2011. T. 5. С. 30-40.