

===== ГЕОЭКОЛОГИЯ =====

УДК 55:504.75:550.348

[DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.29.52.011)

Оригинальная статья

## Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности

М. Г. Попов , О. Г. Попова 

Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, e-mail: mgropov@list.ru, oksana-p@list.ru

Статья поступила: 11.04.2021, доработана: 10.05.2021, одобрена в печать: 18.05.2021

**Резюме: Актуальность работы.** Актуальность настоящей статьи состоит в том, чтобы показать возможность при проведении локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) получать не только двумерное, но и трехмерное представление о глубинном и скоростном строении изучаемого объекта, а также анализировать трехмерные модели показателей напряженного состояния геологической среды во времени. ЛСЭМ проводится на ограниченных территориях с целью оценки степени экологической безопасности и уменьшения риска опасных природных явлений на этапе наблюдения при строительстве и эксплуатации объектов особой важности, таких как ГЭС, АЭС, объектов недропользования, а также мегаполисов. **Цель работы.** Цель настоящей статьи показать результаты трехмерного комплексного изучения среды с помощью локального сейсмо-экологического мониторинга на реальных объектах для районов Балаковской АЭС и Московского мегаполиса. **Методы исследования.** По кинематике обменных волн PS от далеких землетрясений получены данные о рельефе глубинных границ и скоростном строении изучаемых регионов. Построены трехмерные модели глубинного и скоростного строения. По энергии обменных волн от далеких землетрясений оценены показатель анизотропности  $\gamma$  и показатель напряженного состояния среды  $S$  для разных уровней глубин и разных временных интервалов наблюдения в районе планируемой Тверской АЭС. **Результаты исследований.** Построены трехмерные модели показателя анизотропности  $\gamma$ . Полученные трехмерные модели показателя анизотропности  $\gamma$  и оценка показателя  $S$  позволили выявить аномалии показателя  $\gamma$ , усиление и исчезновение этих аномалий в пространстве и во времени, а также выявить влияние далекого катастрофического землетрясения из района Аляски на изменение значений геодинамических показателей. Сделан вывод, что при проведении локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) в разных районах исследования имеется возможность построить трехмерные модели глубинного и скоростного строения исследуемого региона, а также изучить распределение геодинамических показателей анизотропности  $\gamma$  и напряженного состояния  $S$  в разных диапазонах глубин и для разных временных интервалов, и как результат, построить трехмерные модели, характеризующие напряженное состояние региона во времени.

**Ключевые слова:** сейсмо-экологический мониторинг, геодинамические показатели напряженного состояния геологической среды, обменные волны от далеких землетрясений, повышенная экологическая опасность.

**Для цитирования:** Попов М. Г., Попова О. Г. Возможность комплексного изучения геологической среды при сейсмо-экологическом мониторинге в районах повышенной экологической опасности. *Геология и Геофизика Юга России*. 2021. 11 (2): 152 – 164. DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011.

===== GEOECOLOGY =====

[DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.29.52.011)

Original paper

## The possibility of complex studying for the geological environment during seismic- ecological monitoring in areas of increased environmental danger

M. G. Popov , O. G. Popova 

Lomonosov Moscow State University, 1 Lenin Hills, Moscow 119991, Russian Federation,  
e-mail: mgpopov@list.ru, oksana-p@list.ru

Received: 11.04.2021, revised: 10.05.2021, accepted: 18.05.2021

**Abstract: Relevance.** The relevance of this article is to show the possibility of obtaining not only a two-dimensional, but also a three-dimensional idea about the depth and speed structure of the object during researching by local seismic-ecological monitoring (LSEM), as well as to analyze three-dimensional models of indicators of the stress state of the geological environment over time. LSEM is carried out in limited areas in order to assess the degree of environmental safety and reduce the risk of natural hazards at the stage of observation during the construction and operation of facilities of special importance, such as hydroelectric power stations, nuclear power plants, subsoil use facilities, as well as megalopolis. **Aim.** The purpose of this article is to show the results of a three-dimensional complex study of the environment using local seismic-ecological monitoring at real objects for the Balakovo NPP region and the Moscow megalopolis. **Methods.** Based on the kinematics of the converted waves PS from distant earthquakes, data were obtained on the relief of deep borders and the speed structure of the studied regions. Three-dimensional models of deep and speed structure were built. Based on the energy of converted waves from distant earthquakes, the anisotropy indicator  $\gamma$  and the stress state indicator of medium  $S$  for different depth levels and different time observation intervals for the area of the planned Tver NPP were estimated. **Results.** Three-dimensional models of the anisotropy indicator  $\gamma$  are built. The obtained three-dimensional models of the anisotropy indicator  $\gamma$  and the assessment of the indicator  $S$  revealed the anomalies of the indicator  $\gamma$ , the amplification and disappearance of these anomalies in space and in time, as well as the influence of a distant catastrophic earthquake from the Alaska region on the change in the values of geodynamic indicators. It was concluded that when conducting local seismic-ecological monitoring (LSEM) in different study areas, it is possible to build three-dimensional models of the depth and speed structure of the studied region, as well as to study the distribution of geodynamic indicators of anisotropy of  $\gamma$  and stress state  $S$  in different depth ranges and for different time observation intervals, and as a result, to build three-dimensional models characterizing the stressed state of the region in time.

**Keywords:** seismic-ecological monitoring, geodynamic indicators of the stressed state of the geological environment, converted waves from distant earthquakes, increased environmental hazard.

**For citation:** Popov M. G., Popova O. V. The possibility of complex studying for the geological environment during seismic-ecological monitoring in areas of increased environmental danger. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (2): 152 – 164. DOI: 10.46698/VNC.2021.29.52.011.

### Введение

Геологическая среда является неоднородной, состоящей из пустот, флюидов, слоев, блоков и т.п. с разным напряженным состоянием, поэтому ритмы и катастрофы передаются в среде по-разному. Для изучения всех этих процессов требу-

ется геофизический мониторинг, и как частный случай – сейсмический мониторинг. Сейсмический мониторинг – это «длительные непрерывные или циклические (периодические) наблюдения за изменениями сейсмических характеристик определенного участка геологической среды [Гамбурцев, 1982]». На исследуемой территории организуется сеть непрерывных долговременных (или периодических) наблюдений, проводится оперативная обработка и интерпретация сейсмических данных. Результатом этих исследований должен быть выход на прогнозные оценки. В последние годы возникло понятие экологический мониторинг. Этот мониторинг необходим для обеспечения безопасности регионов повышенной сейсмической опасности, особенно мегаполисов, чтобы предупредить возникновение чрезвычайных ситуаций, а также для безопасного выбора мест проектирования и строительства объектов особой важности (АЭС, ГЭС и др.).

Задачи экологического мониторинга для оценки во времени состояния геологической среды на ограниченных территориях с целью уточнения степени их экологической опасности могут решаться с помощью сейсмического мониторинга [Чотчаев и др., 2020, 2021; Zaalishvili, Chernov, 2018, 2021; Zaalishvili et al., 2017, 2018, 2019a, b, 2020a, b, 2021]. Такой сейсмический мониторинг можно назвать локальным сейсмо-экологическим мониторингом (ЛСЭМ) [Попова и др., 2016]. В густонаселенных урбанизированных районах при проведении ЛСЭМ в основном используется сейсмический мониторинг, регистрирующий волны от естественных источников. В основном используются записи далеких землетрясений и записи микросейсмического фона.

В последние пятнадцать лет локальный сейсмо-экологический мониторинг (ЛСЭМ) проводился как в тектонически активных, так и в платформенных регионах [Попова и др., 2016]. Все исследованные объекты можно разделить на три категории: 1) сейсмоопасные зоны, 2) урбанизированные территории мегаполисов, 3) особо важные объекты (например, гидро- и атомные электростанции).

### Методы исследования

При проведении локального сейсмо-экологического мониторинга, как правило, применялась площадная расстановка пунктов наблюдения (локальная сеть), состоящая из 3-компонентных цифровых сейсмических станций. Площадь исследования обычно порядка ( $60*60 \text{ км}^2$ - $40*60 \text{ км}^2$ ). Длительность наблюдения в зависимости от задач мониторинга колебалась от 2-3 месяцев до 11 лет. [Попова и др., 2016]. Оптимальное количество станций на площади  $60*60 \text{ км}^2$  порядка 10-15, но не менее 5-7. Расстояние между станциями составляло 12-20 км, оптимально 16 км.

При оценке сейсмо-экологической опасности важнейшая геодинамическая характеристика геологической среды – это напряженно-деформированное состояние [Голик и др., 2020]. Основными достоинствами ЛСЭМ является возможность оценивать степень напряженного состояния среды на этапе наблюдения, выявлять местную сейсмичность (если таковая имеется) и следить за ее режимом, а также получить представление о глубинном и скоростном строении изучаемого региона. Причем, в результате обработки зарегистрированных записей локального сейсмо-экологического мониторинга получают не только двумерное, но и трехмерное представление о параметрах глубинного и скоростного строения изучаемой среды, а также ее напряженно-деформированного состояния.

Принципы обработки далеких землетрясений для изучения глубинного строения разработаны в методе МОВЗ [Померанцева, Мозженко, 1997]. Интерпретация

кинематики обменных волн PS от далеких землетрясений позволяет получить представление о глубинном строении изучаемой среды. Представление о скоростном строении среды получают по временам вступления волн P от далеких землетрясений, используя метод сейсмической томографии [Aki et al., 1977].

Оценка геофизических показателей, характеризующих напряженное состояние геологической среды в пространстве и во времени проводится по разработанной методике<sup>1</sup>, использующей энергию обменных проходящих волн PS от далеких землетрясений [Попова и др., 2016]. В основе методики лежат представления об особенностях энергии поперечных волн [Гик, 1997; Brady, 74; Crampin, 1981, 1978; Chiarabba et al., 1995; Cristoffersson, Husebye, 2011; Leveque, Musson, 1999; Musson, Trampert, 1992; Motaghi et al., 2012], поскольку обменные волны также являются волнами поперечными.

Для каждого пункта наблюдения геодинамического полигона согласно разработанной методике<sup>1</sup> по записям обменных волн PS от далеких землетрясений оцениваются два показателя [Попова и др., 2016]:

1) Показатель анизотропности среды  $\gamma$  (безразмерная величина) определяется по отношению значений энергии составляющих записи обменных волн PS от далеких землетрясений  $E_R$  – энергии тангенциальной составляющей (PSr) к  $E_V$  – энергии радиальной составляющей (PSv). Таким образом,  $\gamma = E_R/E_V$ . Не следует путать понятия коэффициента анизотропии  $\chi$  [Шнеерсон, 2006] и показателя анизотропности  $\gamma$ , который позволяет констатировать только наличие в среде анизотропии в большей или в меньшей степени.

2)  $S$  – интегральный показатель напряженного состояния среды (безразмерная величина) оценивается на основании характера распределения параметра  $\gamma$  по площади наблюдательной сети мониторинга расчетным путем<sup>1</sup>.

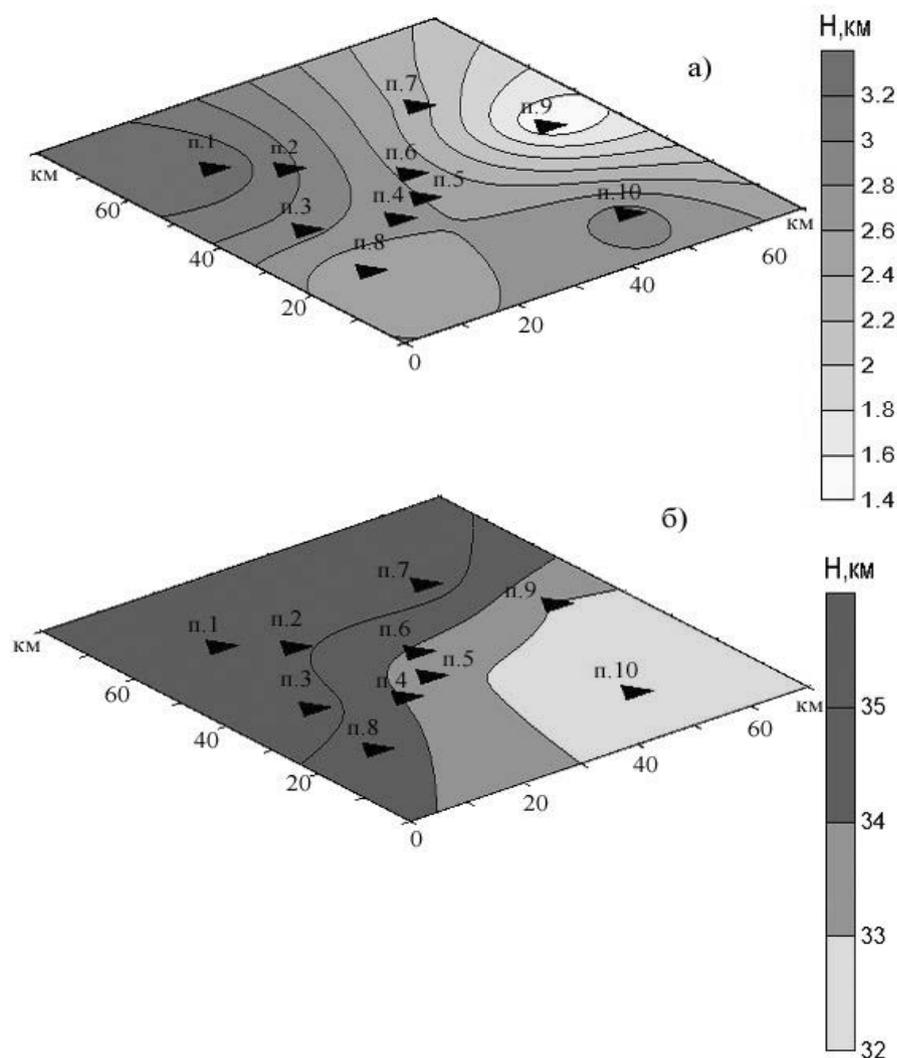
Комплексный анализ всех этих результатов позволяет прогнозировать области повышенной экологической опасности районов исследования, изменение размеров этих областей и миграцию их во времени. К сожалению, длительный (11 лет) и детальный мониторинг был проведен только для региона Кавказских Минеральных Вод [Попова и др., 2016, 2017; Попов, Попова, 2020]. В других регионах работы длились от 2-х-3-х месяцев до года или по 4-5 месяцев с перерывом [Попова и др., 2016].

## Результаты исследований

Как правило, перед началом исследований ЛСЭМ анализируют имеющиеся данные инженерной сейсморазведки, ГСЗ, ультразвукового сейсмического каротажа о строении среды в районе исследования. Но материалы локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) дают дополнительные представления о глубинном и скоростном строении среды в трехмерном представлении. Примеры таких трехмерных моделей приведены на рисунках 1 и 2 для района Балаковской АЭС (Саратовская область) и на рисунке 3 для Московского мегаполиса.

Для района Балаковской АЭС по данным волн PS от далеких землетрясений были построены схемы залегания поверхности фундамента (Ф) (рис. 1а) и подошвы земной коры (граница М) (рис. 1б). Отмечается четкое поднятие фундамен-

<sup>1</sup> Стандарт организации. СТО 93.020-2013/5 «Способ оценки напряженного состояния геологической среды с использованием сейсмических записей далеких землетрясений». <http://geoenv.ru/index.php/ru/info/innovations/innovatsii-i-standarty>.



*Рис. 1. Трехмерная модель глубинного строения для района Балаковской АЭС (Саратовская область):*

*(а) поверхность фундамента (б) поверхность Мохоровичича (М). П. 4 – пункты наблюдения / Fig. 1. Three-dimensional model of the deep structure for the Balakovo NPP area (Saratov region): (a) the surface of the foundation (b) Mohorovicic discontinuity (M). P. 4 – observation points*

та в восточной части региона (глубины 1,6-2,2 км) и его углубление до глубин более 3-х км к западу. Пункты наблюдения 4 и 5, находящиеся вблизи расположения АЭС, находятся в самой сложной зоне изменения глубин поверхности фундамента. В этой же зоне отмечена прерывистость в прослеживании более глубоких границ ниже поверхности фундамента, что позволило предположить наличие разломной зоны.

Схема залегания подошвы земной коры (границы М) приведена на рисунке (рис. 1б). Граница М в северо-западной части более глубокая (глубина 33,5-35,5), а в юго-восточной части воздымается до глубины 32,5-33 км. Структурные планы границ Ф и М не согласуются между собой, и не являются «зеркальными», а повернуты друг относительно друга.

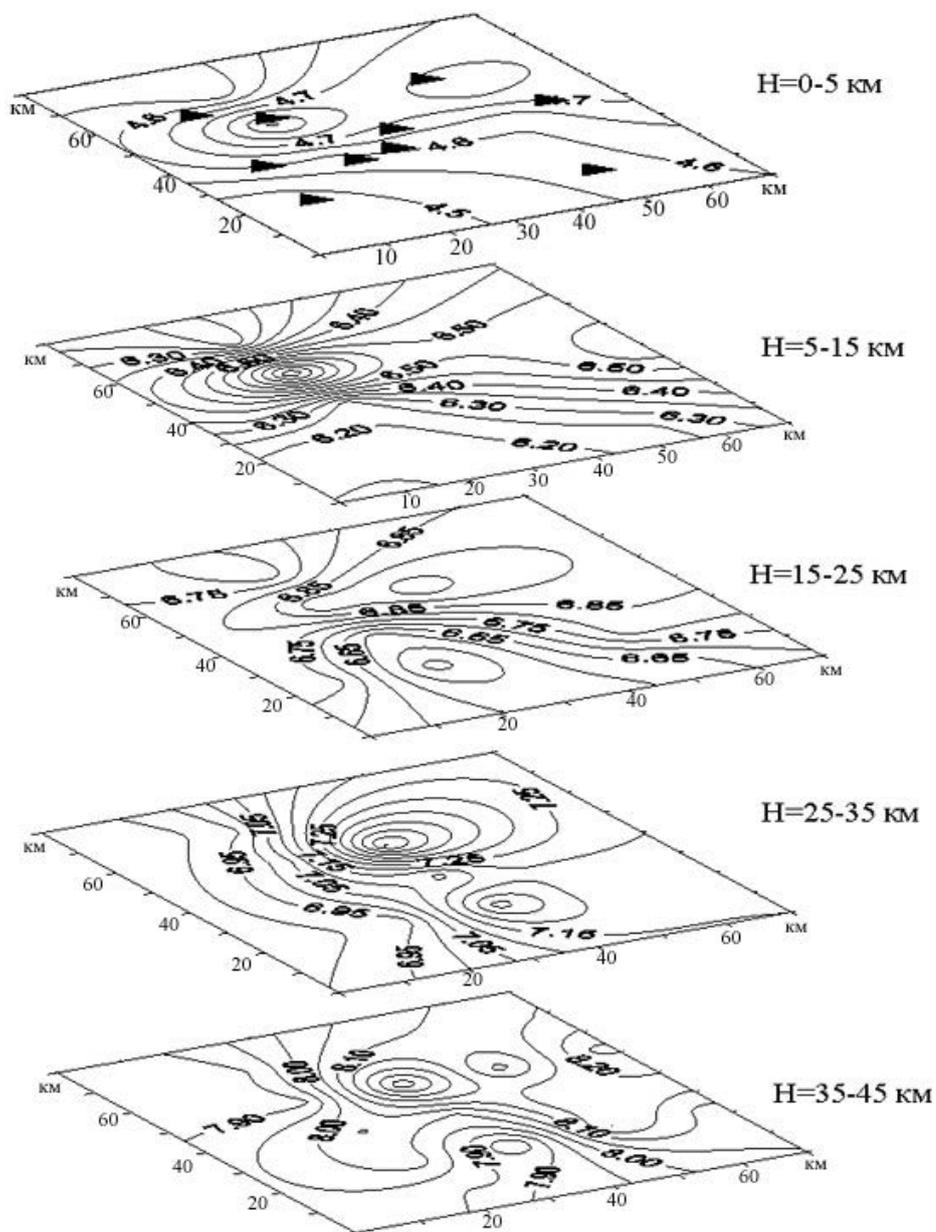


Рис. 2. Трехмерная скоростная модель Балаковского полигона (Саратовская область)

– пункты наблюдения /

Fig. 2. Three-dimensional velocity model of the Balakovo test site (Saratov region).

– observation points

На рисунке 2 приведена трехмерная скоростная модель строения среды, полученная по данным ЛСЭМ для района Балаковской АЭС. Как видно из рисунка, на глубинах 0-25 км выделяется неконтрастная высокоскоростная структура, протягивающаяся с запада на восток. Перепад скоростей от центральной части структуры к периферии составляет 0,2-0,4 км/с. Высокоскоростная часть структуры совпадает с областью наиболее контрастного изменения глубин фундамента (см. выше). В нижней части разреза ( $H > 25$  км) отмечается изменение плана распределения скоро-



которой характерно интенсивное многоэтажное строительство [Севостьянов и др., 2011] и высокий уровень микросейсм, связанных с транспортом. Под влиянием растущей нагрузки мегаполиса на геологический субстрат, являющийся основанием и вмещающей средой инженерных сооружений, транспортных магистралей и коммуникаций, возникает увеличение риска природно-техногенных катастроф. Может произойти снижение устойчивости массивов горных пород, следствием чего является деформация зданий [Вахрина и др., 2018; Никонов, 2016], разрушение подземных коммуникаций и в целом ухудшение общей экологической ситуации. Воздействие микросейсмического фона также сказывается по-разному в зависимости от напряженного состояния среды [Адушкин, Спивак, 2006; Соболев, 2004]. Поэтому изучение напряженного состояния во времени и оценка уровня микросейсмического фона должны быть неразрывно связаны. Все это требует проведения длительного локального сейсмо-экологического мониторинга, и сгущения сети наблюдений в области выделенной куполообразной структуры.

Трехмерные модели распределения показателя анизотропности  $\gamma$  получены для ряда районов экологической опасности, в которых проводился ЛСЭМ [Попов, Попова, 2020]. На рисунке 4 показаны трехмерные модели показателя  $\gamma$  для района планируемой Тверской АЭС, который находится в пределах Крестцовско-Валдайского рифейского авлакогена Восточно-Европейской платформы. На прогностическом полигоне для изучения геологической среды в районе проектируемой Тверской АЭС сейсмо-экологический мониторинг длился 7 месяцев 2012-2013 гг. Цель мониторинга – выявление возможных изменений геодинамических показателей  $\gamma$  и  $S$  в районе размещения сети наблюдений, а также зон с повышенным напряженным состоянием и их миграцию во времени и в пространстве.

Сведения об исторических землетрясениях на Русской платформе содержатся в ряде систематических макросейсмические описаниях [Аптикаев и др., 2012; Борисенков, Пасецкий, 1988; Жигалин, Николаев, 2012; Жигалин, 2014; Никонов, 1984]. С учетом анализа отечественных и зарубежных каталогов рассматриваемый район – это в сейсмическом плане слабоактивная территория, с магнитудой ( $M$ ) возможных землетрясений не более 2-3,5. С 2009 года по настоящее время местных и удаленных землетрясений ( $\Delta < 1000$  км) в районе работ не было зафиксировано.

Территория планируемой Тверской АЭС находится в области воздействия землетрясений из сейсмоопасной зоны Вранча. Последние сильные 3-4-хбалльные воздействия от землетрясения из зоны Вранча ощущались в 1977 г. [Жигалин, Николаев, 2012; Жигалин, 2014]. В работах [Попова и др., 2016] было показано, что за счет влияния далекого катастрофического землетрясения в сейсмоопасных регионах возможно усиление степени анизотропности и напряженного состояния среды, которое в свою очередь может привести к усилению местной сейсмической активизации и возникновению деформационных процессов в среде. Это связано с воздействием интенсивных низкочастотных поверхностных волн, которые регистрируются после волны  $P$ . Такая сейсмическая активизация считается наведенной [Николаев, 1994]. Наведенная сейсмичность имела место и в районе Кольской АЭС, которая считается геодинамически активной областью повышенной сейсмичности, хотя и расположенной на Балтийском щите Восточно-Европейской платформы.

На основании скоростных разрезов профилей ГСЗ – МОВЗ [Егоркин, 1991], земная кора района расположения Тверской АЭС разделена на четыре глубинных диапазона (слоя). Слой 0-2,5 км со скоростью прохождения продольной волны 2,5 км/с

отвечает осадочному чехлу, слой 2,5-10 км со скоростью волны 5,5 км/с – верхней части консолидированной коры, слой 10-22 км со скоростью волны 6,33 км/с – средней части коры и слой 22-32,5 км со скоростью 6,64 км/с отнесен к нижней части коры.

Оценка геодинамических показателей  $S$  и  $\gamma$  была проведена для пяти интервалов наблюдения и четырех диапазонов глубин земной коры 1) 0-2,5 км, 2) 2,5-10 км, 3) 10-22 км, 4) 22-32,5 км (рис. 4). Интервалы наблюдения выбирались с учетом возможности оценки влияния такого внешнего фактора как катастрофическое далекое землетрясение [Попова и др., 2016] и с учетом достаточности для обработки кондиционного фактического материала. На основании результатов обработки по методике<sup>1</sup> были построены 3-х мерные пространственно – временные модели показателя  $\gamma$  и проведена оценка показателя  $S$  (рис. 4). Полученные трехмерные модели позволили выявить аномалии показателя  $\gamma$ , усиление и исчезновение этих аномалий в пространстве, а также определить влияние далеких катастрофических землетрясений на изменение значений геодинамических показателей. В период наблюдения было зарегистрировано всего одно далекое землетрясение с магнитудой  $M = 7.5$ , произошедшее на Аляске 5.01.2013 г.

В первых двух временных интервалах наблюдения (1.11.12-5.01.13) и (5.01.13-31.01.13) показатель анизотропности  $\gamma$  в слое 0-2,5 км не превышал 0,33, а  $S = 0$  (рис. 4). Если сравнить эти показатели с геодинамическими показателями на других полигонах [Попова и др., 2016; Попов, Попова, 2020], то это изменение

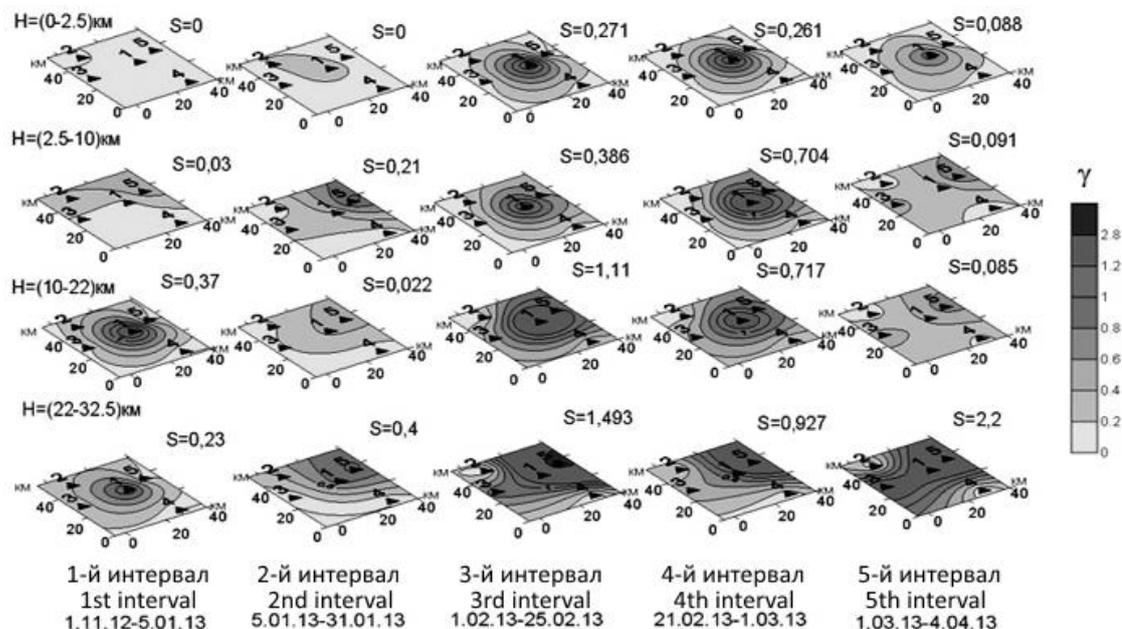


Рис. 4. Трехмерные модели распределения геодинамического показателя анизотропности  $\gamma$  в разные интервалы наблюдений 2012-2013 гг. на Тверском полигоне.

$S$  – оценка значений показателя напряженности.

– пункты наблюдения /

Fig. 4. Three-dimensional models of the geodynamic anisotropy index  $\gamma$  distribution within different intervals of observations in 2012-2013 at the Tver test site.

$S$  – assessment of the values of tension index.

– observation points

можно рассматривать как не существенное, не приводящее к каким-либо последствиям.

Зарегистрированное на Тверском полигоне на рубеже 1-го и 2-го временных интервалов катастрофическое землетрясение, произошедшее на Аляске 5.01.2013 г. с магнитудой  $M=7,5$ , сопровождалось цугом низкочастотных поверхностных волн. Но это не привело к значительному изменению геодинамических показателей ни в одном диапазоне глубин 2-го временного интервала (рис. 4)

В последующие интервалы наблюдения (3-й, 4-й и 5-й) на глубинах 10-32,5 км отмечается некоторое увеличение показателей анизотропности  $\gamma$  и напряженного состояния  $S$  соответственно от 1,5 до 3,3 и от 0,085 до 2,2. Значение 2,2, отмечаемое в 5-м интервале наблюдения, сравнимо со значениями в сейсмоопасных регионах [Попова и др., 2016; Попов, Попова, 2020]. Однако, маловероятно, что эти повышенные значения связаны с наведенными процессами от землетрясения из региона Аляски, поскольку прошло уже два месяца, а наведенные процессы проявляются практически сразу после влияния поверхностных волн, как это отмечалось в сейсмоопасных районах [Попова и др., 2016]. В данном случае увеличение геодинамических показателей на больших глубинах, можно объяснить особенностью глубинного строения земной коры, выраженной древней и очень протяженной вещественно-структурной неоднородностью – Крестцовско-Валдайским рифейским авлакогеном северо-восточного простирания и его современной активизацией.

Таким образом, произошедшее на Аляске далекое катастрофическое землетрясение, не вызвало изменений в значениях геодинамических показателей ( $\gamma$  и  $S$ ) в пределах Тверского полигона. Результаты сейсмического мониторинга по Тверскому полигону очень близки к результатам оценки геодинамических показателей ( $\gamma$  и  $S$ ) Московского полигона [Попова и др., 2016]. Геологическое строение этих двух районов также очень сходно. За время наблюдений на территории Московского мегаполиса возникали контрастные области с высокими значениями коэффициента анизотропности до 2,0-2,8, при этом показатель  $S$  соответственно возрастал до значений 1,5-2,08.

Поскольку территория изучаемого полигона Тверской АЭС находится в 3-4-х балльной области воздействия землетрясений из сейсмоопасной зоны Вранча возможно сложение естественного неотектонического и наведенного полей напряжений, что может привести к увеличению напряжений, а это, в свою очередь, к возникновению разного рода подвижек и деформаций, а также к активизации местных сейсмических событий. В этой связи для района Тверской АЭС рекомендуется проведение постоянного или периодического сейсмо-экологического мониторинга с детальной сетью расположения станций сейсмических наблюдений.

## Выводы

Таким образом, при проведении локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) в разных районах исследования имеется возможность:

1. Построить трехмерную модель рельефа глубинных границ в разных глубинных диапазонах, выявить сложные структуры рельефа этих границ, согласность и несогласность их залегания, наличие возможных глубинных разломов.

2. Получить трехмерную скоростную модель для разных глубинных диапазонов, выявить наличие высокоскоростных и низкоскоростных структур, их размеры, область распространения по латерали и вертикали. Выявить резко градиентные зоны перехода от высокоскоростных структур к низкоскоростным.

3. Уточнить на основании особенностей глубинного и скоростного строения региона конфигурацию сети наблюдения для дальнейшего изучения геодинамических показателей.

4. Изучить распределение геодинамических показателей напряженного состояния  $\gamma$  и  $S$  в разных интервалах глубин и для разных временных интервалов, и как результат, построить трехмерные модели, характеризующие напряженное состояние региона во времени. Выявить области «повышенной напряженности», их контрастность, размеры, распределение по разрезу и во времени, что дает возможность прогнозировать экологическую безопасность региона [Dobrovolsky et al., 1979].

### Литература

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Микросейсмичность и интенсивность релаксационных процессов в земной коре. // ДАН. – 2006. – Т. 408. №4. – С. 532–534.
2. Аптикаев С.Ф., Мирмович Э.Г., Рузайкин А.И. Сейсмическая активность Восточно-Европейской платформы как возможный источник чрезвычайных ситуаций в мегаполисах. // Безопасность жизнедеятельности. – 2012. – №9. – С. 27–36.
3. Борисенков Е.П., Пасецкий В.М. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. – М.: Мысль, 1988. – 524 с.
4. Вахрина Г.Н., Чупанов М.Р., Гизяттулин И.Р. Анализ динамической реакции здания при реальном сейсмическом воздействии. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – №2. – С. 39–45.
5. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
6. Голик В. И., Бурдзиева О. Г., Дзеранов Б. В., Чотчаев Х. О, Управление геодинамикой массива путем регулирования величины напряжений. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10 (2). – С. 147–160. DOI: 10.46698/VNC. 2020.93.21.011.
7. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. №4. – С. 804–815.
8. Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам. / В кн.: Глубинное строение территории СССР. / Ред. В.В. Белоусов, Н.И. Павленкова, Г.И. Кветковская. – М.: Наука, 1991. – С. 118–135.
9. Жигалин А.Д., Николаев А.В. Особенности сейсмичности Восточно-Европейской платформы. // Геоэкология. – 2012. – №5. – С. 449–454.
10. Жигалин А.Д. Особенности сейсмичности московского региона. // Вестник РАЕН. – 2014. – Т. 14. №2. – С. 109–111.
11. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р и S волнах. – Новосибирск: Наука, 1993. – 199 с.
12. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. – М.: Наука, 1994. – 222 с.
13. Никонов А.А. Землетрясения (Прошлое, современность, прогноз). – М.: Знание, 1984. – 192 с.
14. Никонов А.А. К оценке сейсмических воздействий от удаленных глубокофокусных землетрясений на высоких этажах зданий Москвы. // Геоэкология. – 2016. – №3. – С. 195–215.
15. Огаджанов А.В., Маслова М.Ю. Локальная сейсмичность Саратовского геодинамического полигона. // Недра Поволжья и Прикаспия. Региональный научно-технический журнал. – 2017. – Вып. 89. – С. 60–65.
16. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земля. – М.: Недра, 1997. – 256 с.
17. Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В., Васютинская С.Д. Основные результаты по локальному сейсмоэкологическому мониторингу в разных регионах Российской Федерации. // Геоэкология. – 2016. – №6. – С. 483–496.

18. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Геодинамическое состояние среды территорий планируемых и действующих атомных электростанций, расположенных в разных тектонически активных областях. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – №4. – С. 99–108. DOI: 10.23671/VNC.2017.4.9529
19. Попов М.Г., Попова О.Г. Изучение во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 79–93. DOI: 10.46698/VNC.2020.43.14.005
20. Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А., Шпекторова О.А. Сейсмическое микрорайонирование территории г. Москвы для высотного строительства. // Геоэкология. – 2011. – №4. – С. 319–327.
21. Соболев Г.А. Вариации микросейсм перед сильным землетрясением. // Физика Земли. – 2004. – №6. – С. 3–13.
22. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №4. – С. 70–100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.
23. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.
24. Шнеерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. – М.: ГЕРС, 2006. – 160 с.
25. Aki K., Christoffersson A., Husebye E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82. No.2. – pp. 277–296.
26. Brady B.T. Theory of Earthquake. // Pageophys. – 1974. – Vol. 112. No.4. – 701 p.
27. Chiarabba C., Amato A., & Evans J.R. Variations on the neht high-resolution tomography method - a test of technique and results for Medicine-lake volcano, Northern California. // Journal of Geophysical Research-Solid Earth. – 1995. – Vol. 100(B3). – pp. 4035-4052. <https://doi.org/10.1029/94jb02771>
28. Christoffersson A., & Husebye E.S. Seismic tomographic mapping of the Earth's interior - Back to basics revisiting the ACH inversion. // Earth-Science Reviews. – 2011. – Vol. 106(3-4). – pp. 293-306. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.02.007>
29. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. // Wave motion IVO. 3. – 1981. – pp. 343–391.
30. Crampin S. Seismic-wave propogation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. // Geophys J.R. astr. Soc. – 1978. – No.53. – pp. 426–467.
31. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Mishkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zone. // Pure Appl. Geophys. – 1979. – Vol. 117. No.5. – pp. 1025–1044.
32. Leveque J.J., & Masson F. From ACH tomographic models to absolute velocity models. // Geophysical Journal International. – 1999. – Vol. 137(3). – pp. 621-629. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00808.x>
33. Masson F., & Trampert J. On ACH, or how reliable is regional teleseismic delay time tomography? // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1997. – Vol. 102(1-2). – pp. 21-32. [https://doi.org/10.1016/s0031-9201\(97\)00005-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9201(97)00005-8)
34. Motaghi K., Tatar M., Shomali Z.H., Kaviani A., & Priestley K. High resolution image of uppermost mantle beneath NE Iran continental collision zone. // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2012. – Vol. 208. – pp. 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.07.006>
35. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of detailed assessment of the seismic hazard of the Republic of North Ossetia-Alania. // Open Construction and Building Technology Journal. – 2018. – Vol. 12. – pp. 309-318.
36. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. The influence of the rate of increase of ground vibration accelerations during earthquakes on the value of the observed macroseismic effect. // Open Construction and Building Technology Journal. – 2021. – Vol. 15. – pp. 70-80.

37. Zaalishvili V.B., Shempelev A.G., Kukhmazov S.U. Deep structure of the western part of the Central Caucasus from geophysical data. // *Geotectonics*. – 2017. – Vol. 51. No.5. – pp. 479-488.
38. Zaalishvili V.B., Kanukov A., Melkov D., Makiev V.D., Dzobelova L.V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. // *International journal of GEOMATE*. – 2018. – Vol. 15. Issue 51. – pp. 160-166. <https://doi.org/10.21660/2018.51.78666>
39. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Transformation of spectral peculiarities of the soil response to dynamic impacts of varying value. // *Akustika*. – 2019a. – Vol. 34. – pp. 175-180
40. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S. Spectral features of the microseismic field of the urbanized territory. // *Akustika*. – 2019b. – Vol. 32. – pp. 279-283.
41. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing IOP Conference Series. // *Materials Science and Engineering*. – 2020a. – pp. 052050.
42. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2020b. – Vol. 10. No.3. – pp. 94–113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.
43. Zaalishvili V., Kanukov A., Persaeva Z., Shmanatov G. Study of the Ardon deep fault spatial position using high-precision gravity and magnetic measurements. // IV International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development” (CATPID-2021 Part 1) DOI 10.1051/e3sconf/202128109001

## References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. Microseismicity and intensity of relaxation processes in the earth's crust. *DAN*. 2006. No.4. Vol. 408. pp. 532-534. (In Russ.)
2. Aptikhaev S.F., Mirmovich E.G., Ruzaikin A.I. Seismic Activity of the East European Platform as a Possible Source of Emergencies in Metropolitan Areas. *Life safety*. 2012. No. 9. pp. 27–36. (In Russ.)
3. Borisenkov E.P. Pasetskiy V.M. A thousand-year chronicle of extraordinary natural phenomena. Moscow. Mysl, 1988. 524 p. (In Russ.)
4. Vakhrina G.N., Chupanov M.R., Gzyattulin I.R. Analysis of the dynamic reaction of the building under real seismic impact. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2018. No.2. pp. 39-45. (In Russ.)
5. Gamburtsev A.G. Seismic monitoring of the lithosphere. Moscow. Nauka, 1982. 200 p. (In Russ.)
6. Golik V.I., Burdzieva O.G., Dzeranov B.V., Chotchaev Kh.O. Ground geodynamics control by regulating stress level. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 147-160. DOI: 10.46698/VNC. 2020.93.21.011. (in Russ.)
7. Geek L. D. Physical modeling of seismic wave propagation in porous and fractured media. *Geology and Geophysics*. 1997. No.4. Vol. 38. pp. 804-815. (In Russ.)
8. Egorkin A.V. The structure of the Earth's crust according to seismic geotraverses. In: *The deep structure of the territory of the USSR*. Moscow. Nauka, 1991. pp. 118–135. (In Russ.)
9. Zhigalin A.D., Nikolaev A.V. Features of the seismicity of the East European platform. *Geocology*. 2012. No. 5. pp. 449–454. (In Russ.)
10. Zhigalin A.D. Features of seismicity of the Moscow region. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2014. No.2. Vol. 14. pp. 109-111. (In Russ.)
11. Krylov S.V., Mishenkin B.P., Mishenkina Z.R. Detailed seismic studies of the lithosphere at P and S waves. Novosibirsk, Nauka, 1993. 199 p. (In Russ.)
12. Nikolaev A.V. Induced seismicity problems. *Induced seismicity*. Moscow. Nauka, 1994. 222 p. (In Russ.)
13. Nikonov A.A. Earthquakes (Past, Present, Prognosis). Moscow. Znanie, 1984. 192 p. (In Russ.)

14. Nikonov A.A. To assess seismic impacts from remote deep-focus earthquakes on high floors of buildings in Moscow. *Geoecology*, 2016. No.3. pp. 195-215. (In Russ.)
15. Ogadzhyanov A.V., Maslova M.Yu. Local seismicity of the Saratov geodynamic polygon. Subsoil of the Volga region and the Caspian Sea. *Regional Scientific and Technical Journal*, 2017. Out 89. pp. 60-65. (In Russ.)
16. Pomerantseva I.V., Mozzhenko A.N. Seismic research with Zemlya equipment. Moscow. Nedra, 1997. 256 p. (IN Russ.)
17. Popova O.G., Popov M.G., Arakelyan F.O., Nedyadko V.V., Vasyutinskaya S.D. The main results of local seismoecological monitoring in different regions of the Russian Federation. *Geoecology*. 2016. No. 6. pp. 483–496. (In Russ.)
18. Popova O.G., Makeev V.M., Popov M.G., Arakelyan F.O., Nedyadko V.V. A geodynamic condition of the environment of territories of the planned and operating nuclear power plants, active areas located in different tectonic. *Geology and geophysics of the South of Russia*, 2017. No.4. pp. 99-108. DOI: 10.23671/VNC.2017.4.9529 (In Russ.)
19. Popov M.G., Popova O.G. Study in time and space of the stress state of the geological environment. *Geology and Geophysics Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 79–93. DOI: 10.46698/VNC.2020.43.14.005 (In Russ.)
20. Sevostyanov V.V., Mindel I.G., Trifonov B.A., Ragozin N.A., Shpektorova O.A. Seismic microzoning of the territory of Moscow for high-rise construction. *Geoecology*. 2011. No. 4. pp. 319–327. (In Russ.)
21. Sobolev G.A. Variations of microseism before a strong earthquake. *Earth Physics*. 2004. No.6. pp. 3-13. (In Russ.)
22. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No.4. pp. 70-100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005. (in Russ.)
23. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoecological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.1. pp. 81-94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007. (in Russ.)
24. Schneerson M.B. Introduction to Seismic Anisotropy: Theory and Practice. Moscow. GERS, 2006. 160 p. (In Russ.)
25. Aki K., Christoffersson A., Husebye E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. No.2. pp. 277–296.
26. Brady B.T. Theory of Earthquake. *Pageophys.* 1974. Vol. 112. No.4. 701 p.
27. Chiarabba C., Amato A., & Evans J.R. Variations on the neht high-resolution tomography method - a test of technique and results for Medicine-lake volcano, Northern California. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*. 1995. Vol. 100(B3). pp. 4035-4052. <https://doi.org/10.1029/94jb02771>
28. Christoffersson A., & Husebye E.S. Seismic tomographic mapping of the Earth's interior - Back to basics revisiting the ACH inversion. *Earth-Science Reviews*. 2011. Vol. 106(3-4). pp. 293-306. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.02.007>
29. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave motion IVO*. 3. 1981. pp. 343–391.
30. Crampin S. Seismic-wave propogation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys J.R. astr. Soc.* 1978. No.53. pp. 426–467.
31. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Mishkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zone. *Pure Appl. Geophys.* 1979. Vol. 117. No.5. pp. 1025–1044.
32. Leveque J.J., & Masson F. From ACH tomographic models to absolute velocity models. *Geophysical Journal International*. 1999. Vol. 137(3). pp. 621-629. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00808.x>
33. Masson F., & Trampert J. On ACH, or how reliable is regional teleseismic delay time tomography? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1997. Vol. 102(1-2). pp. 21-32. [https://doi.org/10.1016/s0031-9201\(97\)00005-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9201(97)00005-8)

34. Motaghi K., Tatar M., Shomali Z.H., Kaviani A., & Priestley K. High resolution image of uppermost mantle beneath NE Iran continental collision zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2012. Vol. 208. pp. 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.07.006>

35. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. Methodology of detailed assessment of the seismic hazard of the Republic of North Ossetia-Alania. *Open Construction and Building Technology Journal*. 2018. Vol. 12. pp. 309-318.

36. Zaalishvili V.B., Chernov Yu.K. The influence of the rate of increase of ground vibration accelerations during earthquakes on the value of the observed macroseismic effect. *Open Construction and Building Technology Journal*. 2021. Vol. 15. pp. 70-80.

37. Zaalishvili V.B., Shempelev A.G., Kukhmazov S.U. Deep structure of the western part of the Central Caucasus from geophysical data. *Geotectonics*. 2017. Vol. 51. No.5. pp. 479-488.

38. Zaalishvili V.B., Kanukov A., Melkov D., Makiev V.D., Dzobelova L.V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. *International journal of GEOMATE*. 2018. Vol. 15. Issue 51. pp. 160-166. <https://doi.org/10.21660/2018.51.78666>

39. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Transformation of spectral peculiarities of the soil response to dynamic impacts of varying value. *Akustika*. 2019a. Vol. 34. pp. 175-180

40. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S. Spectral features of the microseismic field of the urbanized territory. *Akustika*. 2019b. Vol. 32. pp. 279-283.

41. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Fidarova M.I. GIS-technologies in geophysical information databases processing IOP Conference Series. *Materials Science and Engineering*. 2020a. pp. 052050.

42. Zaalishvili V.B., Pinar A., Erdik M., Burdzieva O.G., Melkov D.A. Issues of seismic risk assessment of Vladikavkaz city. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020b. Vol. 10. No.3. pp. 94–113. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.51.006.

43. Zaalishvili V., Kanukov A., Persaeva Z., Shmanatov G. Study of the Ardon deep fault spatial position using high-precision gravity and magnetic measurements. IV International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice of Innovative Development” (CATPID-2021 Part 1) DOI 10.1051/e3sconf/202128109001