

## ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 55:504.75:550.348

# ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ КАВМИНВОДСКОГО ПОЛИГОНА НА ОСНОВЕ ДОЛГОВРЕМЕННОГО СЕЙСМО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2019 г. О. Г. Попова<sup>1,\*</sup>, М. Г. Попов<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,  
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия  
\*E-mail: oksana-p@list.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,  
Ленинские Горы, 1, Москва, 119991 Россия  
\*\*E-mail: mgpopov@list.ru

Поступила в редакцию 13.05.2019 г.

Непрерывный длительный сейсмо-экологический мониторинг обменных волн от далеких землетрясений позволил получить данные о скоростном строении геологической среды Кавминводского полигона, расположенного в пределах сейсмоопасного Минераловодского региона в Приэльбрусье. В результате исследований получена 3-мерная модель показателя анизотропности  $\gamma$  и показателя напряженного состояния  $S$  на разных уровнях глубин. Установлено, что характер распределения  $\gamma$  и  $S$  непрерывно изменяется по глубине, латерали и во времени. При этом показатель  $S$  меняется циклично. На 3-мерной скоростной модели в геологической среде Кавминводского полигона выделена высокоскоростная изометричная структура, горизонтальные размеры которой не позволяют отнести ее к местной структуре, способной вызвать высокомагнитудное землетрясение.

**Ключевые слова:** анизотропность, напряженность, геологическая среда, сейсмо-экологический мониторинг, микросейсмический фон, далекие катастрофические и местные землетрясения, градиентные зоны высокоскоростных структур.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019515-22>

## ВВЕДЕНИЕ

Все науки о Земле нацелены на установление взаимосвязи разноглубинных процессов и движущих сил, ими управляющих. При оценке сейсмической и экологической опасности напряженно-деформированное состояние геологической среды – важнейшая геодинамическая характеристика регионов. От оценки тектонических полей напряжений и факторов, определяющих энергетику возможных сейсмических событий, зависит правильность выбора места проектирования и строительства мегаполисов, особо ответственных и опасных объектов, курортных территорий и т.д. в аспекте обеспечения их безопасности. Перечисленные задачи в большой степени решаются на основе геофизического мониторинга и, в частности, методом локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ) геологической среды. В густонаселенных урбанизированных районах проведение сейсмического мониторинга с искусственными источниками затруднено, поэтому в настоящее время используются волны от естественных источников.

В течение последних пятнадцати лет в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) для изучения геодинамики геологической среды применяется метод локального сейсмо-экологического мониторинга от естественных источников [8–12]. Для этого используются записи далеких землетрясений и микросейсмического фона.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки напряженно-деформированного состояния геологической среды была разработана методика, использующая энергетические характеристики обменных проходящих волн PS от далеких землетрясений<sup>1</sup>. Методика позволяет определять геодинамический показатель анизотропности среды  $\gamma$  (безразмерная величина)

<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-istandarty>

и интегральный показатель напряженного состояния среды  $S$  (безразмерная величина) для разных диапазонов глубин земной коры в различные интервалы времени наблюдения и строить 3-мерные модели распределения показателя  $\gamma$  по площади геодинамического полигона [9-12]. Длительность интервала времени наблюдения колеблется от 12 до 40 суток (в среднем один месяц) в зависимости от качества записи проходящих обменных волн PS от зарегистрированных далеких землетрясений.

В последнее время проанализированы результаты непрерывного сейсмо-экологического мониторинга, проведенного в разных регионах Российской Федерации [10]:

- сейсмоопасных районах Кавказских Минеральных Вод, Геленджика и Камчатки;
- Московском мегаполисе,
- районах проектируемых и действующих особо опасных объектов (Северская АЭС, Кольская АЭС, Белоярская АЭС, Нижегородская АЭС, Тверская АЭС).

Длительность наблюдения в разных регионах колебалась от 2-3 месяцев до 11 лет в зависимости от задач мониторинга. Для наблюдения использовались цифровые 3 компонентные станции типа Дельта-Геон [13].

При проведении ЛСЭМ в указанных выше регионах использовалась площадная расстановка пунктов наблюдения (локальная сеть). Площадь района исследования в среднем составляла порядка 60х60 км. Оптимальное количество станций на ней – 10-15, но не менее 5. Расстояние между станциями – 12-20 км, оптимально – 16 км.

Для каждого пункта наблюдения исследуемого региона по энергии проходящих обменных волн далеких землетрясений (PS) рассчитывалось значение показателя анизотропности  $\gamma$  [9] (не следует путать с коэффициентом анизотропии  $\chi$  [14]) в выбранном интервале глубин и строились схемы его распределения, соответствующие определенным диапазонам глубин для разных интервалов времени наблюдения. Далее по специальной формуле [9] оценивался интегральный показатель напряженного состояния среды  $S$  для каждой схемы. В результате получались зависимости изменения показателя  $S$  во времени и по глубине, а также набор схем распределения показателя  $\gamma$  для различных диапазонов глубин и разных интервалов времени.

Наиболее длительный непрерывный сейсмо-экологический мониторинг из всех выше перечисленных регионов (11 лет) проводился в районах Минераловодского выступа (Кавказские Минеральные Воды); длительность мониторинга Мос-

ковского мегаполиса – 2 года, Томского полигона (площадка под Северскую АЭС) – около 2 лет, Нижегородского полигона (площадка под Нижегородскую АЭС) – 1 год. Именно по этим материалам удалось выявить закономерности изменения геодинамических показателей напряженного состояния среды  $\gamma$  и  $S$  во времени в разных средах и провести соответствующее обобщение [10, 11].

Для большей части рассмотренных регионов показатели  $\gamma$  и  $S$  во времени оценены для одного диапазона глубин 0-30 км. Сделаны выводы, что геодинамические показатели напряженного состояния в этом диапазоне глубин в средах разной тектонической активности изменяются во времени, однако уровень и контрастность изменений оценочных геодинамических показателей существенно (в 100-10 раз) отличаются в сейсмоопасных и асейсмичных регионах [10]. Выявлено влияние внешних природных факторов на изменение геодинамических показателей напряженного состояния среды, на усиление сейсмической активности, а также на амплитудно-частотные характеристики микросейсмического фона. К внешним природным факторам относятся ежесуточные приливные воздействия Солнца и Луны, лунные и солнечные затмения, влияние Луны в различных ее фазах, солнечная активность (магнитные бури), изменение скорости вращения Земли, воздействие катастрофических далеких землетрясений.

Для Кавминводского, Кольского и Нижегородского полигонов проведена оценка показателей напряженного состояния геологической среды  $\gamma$  и  $S$  для более детального расчленения среды на глубинные интервалы [11, 12]. И только для одного Кавминводского полигона удалось выявить закономерности изменения показателей напряженного состояния геологической среды с глубиной, поскольку наблюдения мониторинга в этом регионе были самые длительные.

### ГЛУБИННО-СКОРОСТНОЕ СТРОЕНИЕ КАВМИНВОДСКОГО ПОЛИГОНА

Район Кавказских Минеральных Вод сейсмически активен и относится к зоне, где возможны 7-8-балльные землетрясения по шкале MSK [6]. Сейсмичность в этом районе мелкофокусная, коровая. На картах распределения эпицентров землетрясений по глубинам видно, что очаги ниже 20-25 км здесь практически отсутствуют [4]. Очевидно, что все современные деформации связаны с распределением напряжений в самой верхней части литосферы, где идут перемещения и взаимодействие относительно небольших блоков.

Скоростное строение среды Кавминводского полигона определялось по записям Р-волн от да-

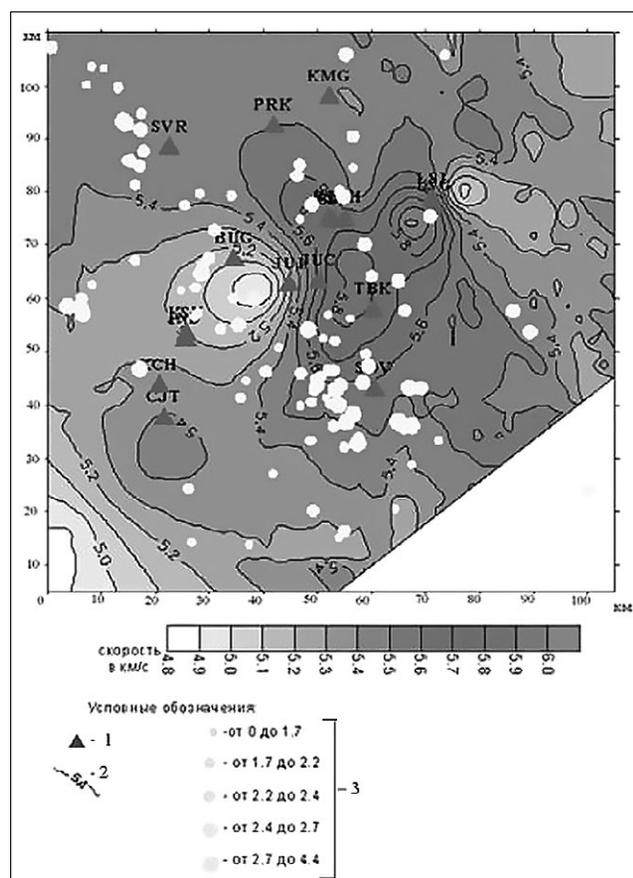
леких землетрясений, зарегистрированных при сейсмо-экологическом мониторинге. Учитывались временные задержки Р-волн от регионально-го годографа с применением метода сейсмической томографии [15-17]. По результатам обработки получена 3-мерная модель скоростного строения региона исследования, а именно распределение скоростей на глубинных уровнях 0-7, 7-18, 18-30 и 30-52 км. В верхней части земной коры (0-7 км) выделяется резко контрастная, немного вытянутая высокоскоростная структура, простирающаяся в направлении С-СЗ – Ю-ЮВ (рис. 1).

Перепад скоростей высокоскоростной структуры по отношению к окружающим низкоскоростным геоблокам составляет 0.8 км/с. Эта высокоскоростная структура прослеживается на глубину до 18 км и разрушается на уровне глубин 25-30 км. Размеры структуры по простиранию не определены, так как она протягивается за пределы района исследований. Поперечные размеры высокоскоростной структуры изменяются от 20 до 30 км. На глубинах более 30 км находятся низкоскоростная кора и достаточно контрастная по скоростям верхняя мантия до глубин 84 км. На скоростном

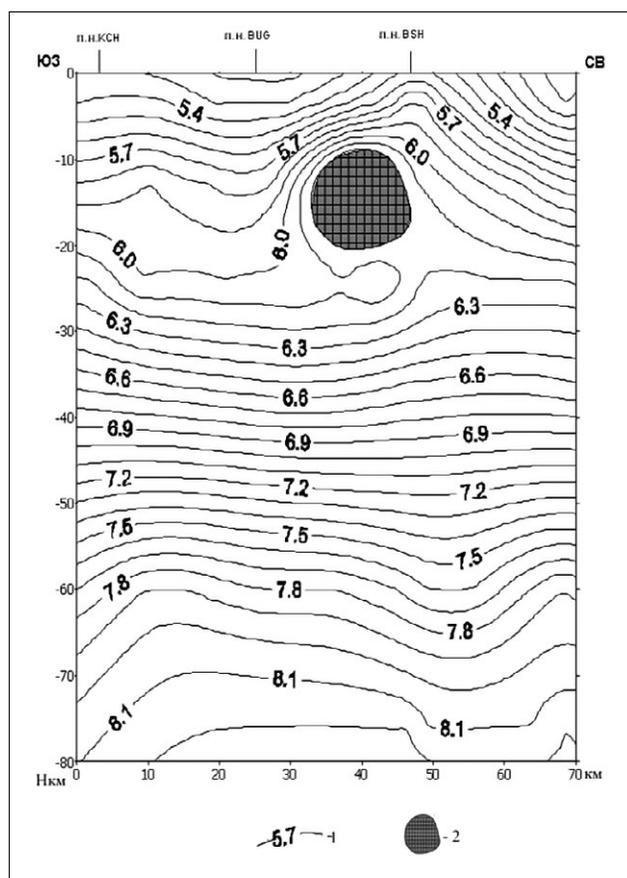
разрезе в крест простирания высокоскоростной структуры (рис. 2) достаточно контрастно вырисовывается высокоскоростное ядро до глубин 20 км с превышением скорости по отношению к окружающей среде до 0.8-1.0 км/с.

Гипоцентры большинства местных землетрясений на всех уровнях глубин тяготеют к внешним частям высокоскоростной структуры (см. рис. 1). В связи с этим важно отметить, что ранее при анализе особенностей строения земной коры сейсмоактивных районов по материалам глубинного сейсмического зондирования [3, 5, 7] было показано, что очаги сильных землетрясений (Газлийского, Спитакского, Казанджигского, Дагестанского и др.) также приурочены к периферийным (градиентным) зонам высокоскоростных структур консолидированной коры.

Таким образом, наблюдается связь сейсмогенирующего объема активизированной коры с определенным типом коровых структур – куполовидными, возможно, диапировыми образованиями, содержащими высокоскоростные ядра. Это отвечает представлениям Гамбурцева Г.А. [1]



**Рис. 1.** Скоростное строение среды на глубинах 0-7 км. 1 – пункты наблюдения, 2 – изолинии скорости, 3 – эпицентры местных землетрясений с магнитудами  $M=0-4.4$ .



**Рис. 2.** Скоростной разрез в крест простирания высокоскоростной структуры. 1 – изолинии скорости, 2 – высокоскоростное ядро.

и Добровольского И.П. [2] о свойствах сейсмогенной коры.

Согласно теории Добровольского И.П. [2], для накопления потенциальной энергии, необходимой для возникновения сильного землетрясения, размеры высокоскоростной структуры должны быть значительными. Так, горизонтальные размеры структур, с которыми связаны катастрофические землетрясения Газли, Казанджика и Спитака, – не менее 120-150 км.

Рассматриваемый район Кавминвод по типам скоростного разреза коры подобен районам, где происходили сильные землетрясения, но отличается меньшими поперечными размерами структуры – накопителя упругой энергии, что в принципе позволяет прогнозировать и более низкий энергетический класс возможных сейсмических событий. Горизонтальные размеры высокоскоростной структуры, выявленной на территории Кавминводского полигона, не превышают 40x75 км, и маловероятно, чтобы она смогла накопить энергию, способную вызвать катастрофическое землетрясение. Это подтверждают и результаты изучения местной сейсмической активности: максимальные величины магнитуд не превышают 5.1-5.3.

В итоге можно сделать вывод, что Приэльбрусский Минераловодский регион, в котором расположен Кавминводский полигон, не является территорией катастрофической опасности. Сейсмоактивность региона ограничена умеренными магнитудами и характеризуется постоянным устойчивым фоном слабых местных и микроземлетрясений.

## ИЗУЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Для изучения изменения показателя анизотропности  $\gamma$  по глубине и во времени для 26 интервалов наблюдения (таблица) были построены 3-мерные модели. Эти 26 интервалов наблюдения соответствуют трем годам непрерывных наблюдений, в течение которых на территории Кавминводского полигона работало максимальное количество цифровых станций (12-15). Кроме того, в течение этого периода наблюдения не отмечено влияния такого внешнего природного фактора, как далекое катастрофическое землетрясение [8], которое могло бы существенным образом изменить показатели анизотропности  $\gamma$  и напряженного состояния  $S$ , вызвав при этом активизацию местной сейсмической активности. Можно считать, что в течение указанных лет напряженное состояние среды определялось только местными тектоническими процессами.

Полученные 3-мерные модели показателя  $\gamma$  приведены на рис. 3 для 8 интервалов наблюдения. Как видно из рисунка, характер распределения показателя анизотропности по площади полигона непрерывно изменяется по глубине, латерали и во времени. В интервалах времени с 1 по 10 (примерно 1.5 года наблюдений) на глубинах до 10 км значения показателя  $\gamma$  малы ( $<0.8$ ), среда на глубинах 0-10 км практически изотропна. Глубины более 15 км отличаются повышенными значениями показателя  $\gamma$  (1.6-2.8).

Начиная с 16-го интервала наблюдений на глубинах 7.5-15 км в области ядра куполообразной высокоскоростной структуры образуется локальный

**Таблица.** Временные интервалы наблюдения, для которых были построены 3-мерные модели распределения показателя анизотропности  $\gamma$

№ временного интервала	Время наблюдений	№ временного интервала	Время наблюдений
1	25.08.95-04.10.95	14	18.02.97-26.03.97
2	05.10.95-08.11.95	15	30.03.97-23.06.97
3	14.11.95-28.12.95	16	24.06.97-16.07.97
4	29.12.95-31.01.96	17	17.07.97-25.08.97
5	01.02.96-19.02.96	18	26.08.97-01.10.97
6	27.03.96-09.06.96	19	02.10.97-20.10.97
7	10.06.96-21.07.96	20	21.10.97-20.11.97
8	22.07.96-03.09.96	21	21.11.97- 17.12.97
9	04.09.96-30.09.96	22	18.12.97-05.02.98
10	01.10.96-31.10.96	23	06.02.98-16.03.98
11	01.11.96-01.12.96	24	17.03.98-22.04.98
12	03.12.96-10.01.97	25	23.04.98-15.06.98
13	11.01.97-17.02.97	26	17.07.98-20.08.98

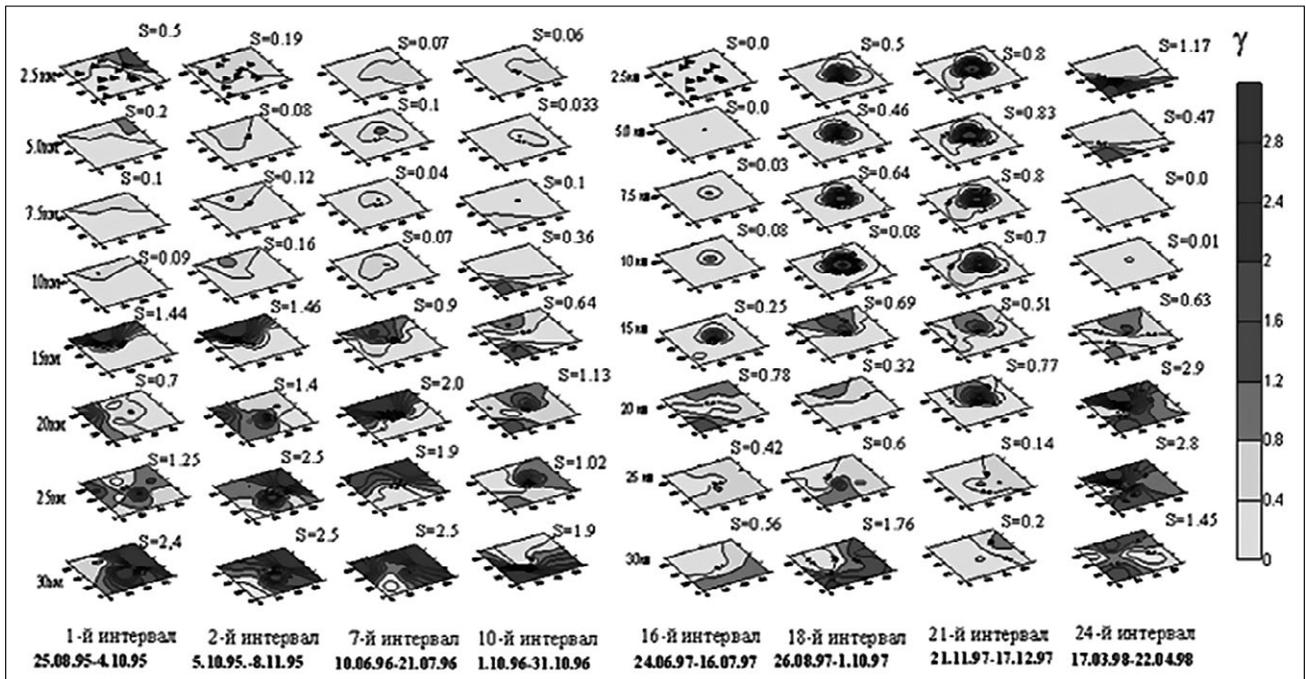


Рис. 3. Трехмерные модели распределения показателя анизотропности  $\gamma$ .

очаг повышенных значений показателя анизотропности  $\gamma$  (см. рис. 3).

Этот очаг увеличивается в размерах, распространяется до приповерхностной части геологической среды и становится очень “интенсивным” (значения  $\gamma$  более 2.8) (21-й интервал наблюдений, см. рис. 3), что указывает на возрастание напряженного состояния на глубинах 0-10 км. При этом значения показателя  $\gamma$  на глубинах более 15 км существенно ослабевают.

Перед 24-м интервалом времени в районе изучаемого полигона произошло резкое изменение распределения показателя анизотропности. В результате отмечается исчезновение локального очага повышенных значений показателя на глубинах 0-10 км, среда на этих глубинах становится практически изотропной. При этом на глубинах более 15 км значения показателя  $\gamma$  резко возросли (см. рис. 3).

Для каждого интервала наблюдения для всех схем распределения показателя  $\gamma$ , соответствующих разным глубинным уровням, был рассчитан показатель напряженного состояния  $S$ , и построена зависимость изменения этого параметра по глубине и во времени (рис. 4). Из рисунка видна цикличность в изменении напряженного состояния во времени на всех глубинах. Выделяется временной блок (до 500 сут), когда среда находилась в напряженном состоянии. Причем напряжение распространялось снизу вверх. В период 500-700 сут наблюдения в среде напряженность отсутствовала, ослабление напряжения распростра-

нялось сверху вниз. В последующий временной интервал напряженное состояние среды вновь нарастало, и повышенное напряженное состояние стало характерным для всего разреза.

Таким образом, длительные сейсмо-экологические наблюдения позволили выявить цикличность в изменении напряженного состояния геологической среды. Среда как бы “дышит”: периоды повышенного напряженного состояния сменяются пониженными его значениями. Причем в это “дыхание” вовлечены все уровни исследуемых глубин — от земной поверхности до глубины 35 км.

## ВЫВОДЫ

Длительный локальный сейсмо-экологический мониторинг геологической среды Кавминводского полигона, проведенный в Минераловодском сейсмоопасном регионе, позволил сделать следующие выводы.

1. С помощью метода сейсмической томографии по волнам Р от далеких землетрясений получена 3-мерная скоростная модель региона.
2. Показано, что в верхней части земной коры (0-18 км) выделяется резко-контрастная изометричная высокоскоростная структура, простирающаяся в субмеридиональном направлении. Перепад скоростей высокоскоростной структуры по отношению к окружающим низкоскоростным структурам составляет 0.8 км/с.

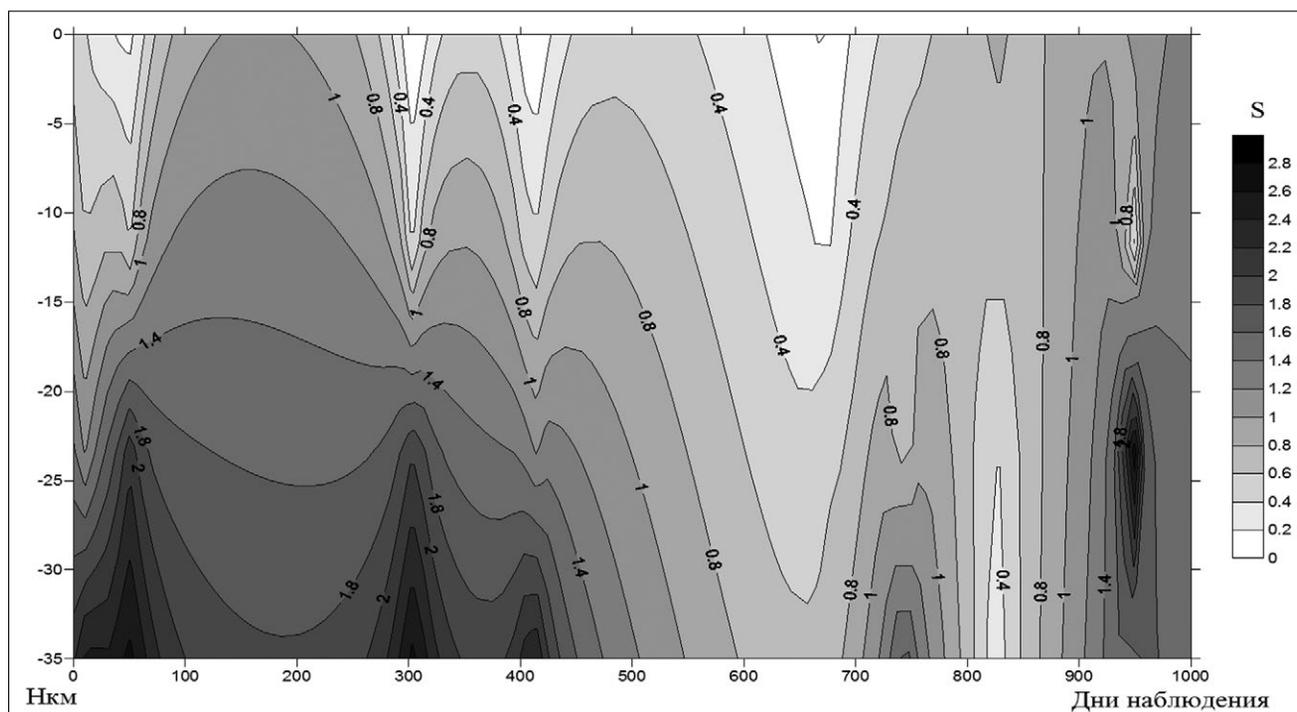


Рис. 4. Изменение показателя напряженного состояния  $S$  во времени и по глубине.

3. Горизонтальные размеры высокоскоростной структуры не позволяют прогнозировать высокую магнитуду местных землетрясений в исследуемом районе.

4. По данным проходящих обменных волн PS от далеких землетрясений построены 3-мерные модели показателя анизотропности  $\gamma$ . Установлено, что характер распределения показателя анизотропности по площади полигона непрерывно изменяется по глубине, латерали и во времени.

5. Результаты оценки показателя напряженного состояния  $S$  выявили цикличность в изменении этого показателя во времени и на всех глубинах. Периоды повышенного напряженного состояния сменяются пониженным напряжением в среде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. М.: Наука, 1982. 200 с.
2. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 216 с.
3. Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам // Глубинное строение территории СССР // Ред. В.В. Белоусов, Н. И. Павленкова, Г. И. Кветковская. М.: Наука, 1991. С. 118-135.
4. Короновский Н.В. Демина Л.Н. Коллизионный этап развития Кавказского сектора Альпийского складчатого пояса: геодинамика и магматизм // Геотектоника. 1999. №2. С. 17-35.
5. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р и S волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.
6. Милановский Е.Е., Расцветаев А.В., Кухмазов С.У., Бирман А.С. и др. Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. С. 99-105.
7. Попова О.Г., Коновалов Ю.Ф., Попов М.Г. Особенности структуры земной коры сейсмоопасных и асейсмичных регионов по данным геотраверсов (на примере профилей Базальт, Рубин, Кварц и Армаш-Ахалцихе) // Вулканология и сейсмология. 1998. №4-56. С. 178-189.
8. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Недядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние среды удаленных территорий // Геофизика XXI столетия: 2006 г. Сб. трудов восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: ГЕРС, 2007. С. 200-204.
9. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф. Результаты долговременного сейсмического мониторинга в сейсмоопасном районе Кавказских Минеральных Вод // Геоэкология. 2008. №2. С. 135-140.
10. Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В., Васютинская С.Д. Основные результаты по локальному сейсмо-экологическому

мониторингу в разных регионах Российской Федерации // *Геоэкология*. 2016. №6. С. 483-496.

11. 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.
12. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Оценка геодинамики платформенных территорий по результатам сейсмо-экологического мониторинга // *Геоэкология*. 2018 №4. С. 40-52.
13. Солодилов Л.Н., Попова О.Г., Коновалов Ю.Ф. Возможность мониторинга состояния земной коры с использованием записей далеких землетрясений // *Разведка и охрана недр*. 1999. №11. С. 51-53.
14. Шнеерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. М.: ГЕРС, 2006. 160 с.
15. Aki K., Christoffersson A., Husebye E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. №. 2. P. 277-296.
16. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media // *Wave motion*. 1981. V. 3. P. 343-391.
17. Crampin S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic // *Geophys J.R. astr. Soc.* 1978. №53. P. 426-467.
18. volnakh [Detailed seismic research of the lithosphere on P and S waves]. Novosibirsk, Nauka, 1993, 199 p. (in Russian)
6. Milanovskii, E.E., Rastsvetaev, A.V., Kukhmazov, S.U., Birman, A.S., etc. *Noveishaya geodinamika El'brussko-Mineralovodskoi oblasti Severnogo Kavkaza* [The newest geodynamics of the Elbrus and Mineralnye Vody region in the North Caucasus]. *Geodinamika Kavkaza* [Geodynamics of the Caucasus]. Moscow, Nauka 1989, pp. 99-105. (in Russian)
7. Popova, O.G., Kononov, Yu.F., Popov, M.G. *Osobennosti struktury zemnoi kory seismoopasnykh i aseismichnykh regionov po dannym geotraversov (na primere profilei Baza'lt, Rubin, Kvarts i Armash-Akhaltsikhe)* [Features of crust structure in seismic and aseismic regions according to geotraverses (by the example of the Basalt, Rubin, Quartz and Armash-Akhaltsikhe profiles)]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 1998, no. 4-5, pp. 178-189. (in Russian)
8. Popova, O.G., Seryi, A.V., Kononov, Yu.F., Nedyad'ko, V.V. *Vliyanie katastroficheskikh zemletryasenii na napryazhennoe sostoyanie sredy udalennykh territorii* [Influence of catastrophic earthquakes on the stress state of the environment in remote areas]. *Geophysics of the XXI century: 2006. Proc. 8th Geophysical V.V. Fedynskii Conference*. Moscow, 2007, pp. 200-204 (in Russian)
9. Popova, O.G., Seryi, A.V., Kononov Yu.F. *Rezultaty dolgovremennogo seismicheskogo monitoring v seismoopasnom raione Kavkazskikh Mineral'nykh Vod* [Results of long-term seismic monitoring in the seismic-prone region of Caucasus Mineral Waters]. *Geoekologiya*, 2008, no. 2, pp. 135-140. (in Russian)
10. Popova, O.G., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V., Vasyutinskaya, S.D. *Osnovnye rezultaty po lokal'nomy seismo-ekologicheskomy monitoring v raznykh regionakh Rossiiskoi Federatsii* [The main results on local seismic-ecological monitoring in different regions of the Russian Federation]. *Geoekologiya*, 2016, no. 6, pp. 483-496. (in Russian)
11. Popova, O.G., Makeev, V.M., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V. *Geodinamicheskoe sostoyanie sredy territorii planiruemykh i desityvuyushchikh atomnykh elektrostantsii, raspolozhennykh v raznykh tektonicheskii aktivnykh oblastiakh* [Geodynamic state of the environment in the areas of planned and operating nuclear power plants, located in different tectonically active areas]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2017, no. 4, pp. 99-108. (in Russian)
12. Popova, O.G., Makeev, V.M., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V. *Otsenka geodinamiki platformennykh territorii po rezultatam seismo-ekologicheskogo monitoring* [Assessment of geodynamics in the platform territories by the results of seismic ecological monitoring]. *Geoekologiya*, 2018, no. 4, pp. 40-52. (in Russian)

## REFERENCES

1. Gamburtsev, A.G. *Seismicheskii monitoring litosfery* [Seismic monitoring of the lithosphere]. Moscow, Nauka, 1982, 200 p. (in Russian)
2. Dobrovolskii, I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [Theory of preparation of a tectonic earthquake]. Moscow, IFZ AN SSSR, 1991, 216 p. (in Russian)
3. Egorkin, A.V. *Stroenie zemnoi kory po seismicheskim geotraversam* [The structure of the Earth crust by the seismic geotraverses]. *Glubinnoe stroenie territorii SSSR* [Deep structure of the USSR territory]. V.V. Belousov, N.I. Pavlenkova, and G.I. Kvetkovskaya, Eds. Moscow, Nauka, 1991, pp. 118-135. (in Russian)
4. Koronovskii, N.V., Demina, L.N. *Kollizionnyi etap razvitiya Kavkazskogo sektora Al'piiskogo skladchatogo poyasa: geodinamika i magmatizm* [Collision development stage of the Caucasian sector of the Alpine folded belt: geodynamics and magmatism]. *Geotektonika*, 1999, no. 2, pp. 17-35. (in Russian)
5. Krylov, S.V., Mishen'kin, B.P., Mishen'kina, Z.R. *Detal'nye seismicheskie issledovaniya litosfery na P i S*

13. Solodilov, L.N., Popova, O.G., Kononov, Yu.F. *Vozmozhnost' monitoringa sostoyaniya zemnoi kory s ispol'zovaniem zapisei dalekikh zemletryasenii* [Possibility of Earth crust state monitoring using the records of far-distant earthquakes]. *Razvedka i okhrana nedr*, 1999, no.11, pp. 51-53 (in Russian)
14. Schneerson, M.B. *Vvedenie v seismicheskuyu anizotropiyu: teoriya i praktika* [Introduction to seismic anisotropy: theory and practice]. Moscow, GERS, 2006, 160 p. (in Russian)
15. 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.
16. Crampin, S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave motion* vol. 3, 1981, pp. 343-391.
17. Crampin, S. Seismic-wave propagation through a cracked solid: polarization as a possible dilatancy diagnostic. *Geophys J.R. astr. Soc.*, 1978, no. 53, pp. 426-467.

## ASSESSMENT OF THE GEOENVIRONMENT STRESS STATE AT THE CAUCASIAN MINERAL WATERS TEST PLOT USING LONG-TERM SEISMIC-ECOLOGICAL MONITORING

© 2019 O. G. Popova<sup>1,\*</sup>, M. G. Popov<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

*\*E-mail: oksana-p@list.ru*

<sup>2</sup>*Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University,  
Vorob'evy Gory, 1, Moscow, 119899 Russia*

*\*\*E-mail: mgpopov@list.ru*

According to the results of continuous long-term seismic-ecological monitoring at the Caucasian Mineral Waters test plot (the seismic zone in the Cis-Elbrus region), data on the seismic velocity distribution pattern were obtained for the test plot territory. The high-speed structure is revealed, the horizontal dimensions of which do not allow predicting local earthquakes with a very high magnitude in this territory. Three-dimensional models of anisotropy index  $\gamma$  were obtained and the indexes of stress state  $S$  were estimated for different depths according to the interpretation results of converted PS waves from distant earthquakes. It is found that the distribution of the anisotropy index  $\gamma$  varies continuously by the depth, by the laterals and in time. The cyclic changes in the index  $S$  with time are noted for all depths.

**Keywords:** *anisotropy, stress state, geoenvironment, seismic-ecological monitoring, microseismic background, distant catastrophic and local earthquakes, gradient zones of high-speed structures.*

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019515-22>