

УДК 55:504.75:550.348

DOI: [10.46698/VNC.2020.43.14.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.43.14.005)

Оригинальная статья

Изучение изменений во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды

М. Г. Попов , О. Г. Попова 

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

Статья поступила: 05.08.2020, доработана: 31.08.2020, одобрена в печать: 02.09.2020

Резюме: Актуальность работы. При оценке сейсмической и экологической опасности напряженно-деформированное состояние геологической среды является важнейшей геодинамической характеристикой районов гидравлических (ГЭС) и атомных (АЭС) электростанций, предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), химической промышленности, стратегически важных объектов, густонаселенных мегаполисов и курортных районов. **Цель работы.** В статье обобщены полученные результаты значений геодинамических показателей напряженно-деформированного состояния среды для разных по своей тектонической активности районов РФ. **Методы исследования.** Локальный сейсмо-экологический мониторинг (ЛСЭМ) позволяет оценивать значения геодинамических показателей анизотропности γ и напряженного состояния среды S по энергии обменных волн PS от далеких землетрясений. Эти показатели характеризуют состояние среды во времени и в пространстве. Наблюдения во всех регионах проводились с помощью локальной сети (площадная расстановка) трехкомпонентными станциями типа Дельта-Геон. **Результаты.** Приведены основные закономерности изменения значений геодинамических показателей для одного интервала глубин: диапазон значений γ и S в районах разной тектонической активности, цикличность их изменений и влияние на них внешних природных факторов (Луны, Солнца, солнечной активности и т. д.). По результатам самых длительных наблюдений ЛСЭМ (1995-2006г) на Кавминводском полигоне (сейсмоопасный Минераловодский регион) получены 3-х мерные модели показателя анизотропности γ и проведена оценка показателей напряженного состояния S на разных уровнях глубин. Показано, что характер распределения показателя анизотропности γ непрерывно изменяется по глубине, латерали и во времени. Выявлена цикличность в изменении показателя S во времени на всех глубинах. Создание таких 3-х мерных моделей и для других особо важных объектов позволит дать более объективную картину напряженно-деформированного состояния геологической среды, что требует, однако, более длительных наблюдений.

Ключевые слова: локальный сейсмо-экологический мониторинг, обменные волны PS от далеких землетрясений, геодинамические показатели напряженного состояния среды.

Для цитирования: Попов М. Г., Попова О. Г. Изучение изменений во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды. *Геология и Геофизика Юга России*. 2020. 10 (3): 79 – 93. DOI: 10.46698/VNC.2020.43.14.005.

DOI: [10.46698/VNC.2020.43.14.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.43.14.005)

Original paper

Study of Changes in Time and in Space of Stressed State of Geological Environment

M. G. Popov^{ID}, O. G. Popova^{ID}

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

Received: 05.08.2020, revised: 31.08.2020, accepted: 02.09.2020

Abstract: Relevance. When assessing seismic and environmental hazards, the stress-strain state of the geological environment is the most important geodynamic characteristic of the areas of hydraulic (HPP) and nuclear (NPP) power plants, nuclear fuel cycle (NFC) enterprises, the chemical industry, strategically important objects, densely populated megacities and resort areas. **Aim.** The article summarizes the results obtained for the values of the geodynamic indicators of stress-strain state of the medium for regions of the Russian Federation that are different in their tectonic activity. **Methods.** Local seismic-ecological monitoring (LSEM) allows us to assess the values of the geodynamic indicators of anisotropy and the stress state of the medium S from the energy of the exchange waves PS from distant earthquakes. These indicators characterize the state of the environment in time and space. Observations in all regions were carried out using a local network (areal arrangement) of three component stations of the Delta-Geon type. **Results.** The basic laws of changing the values of geodynamic indicators for one depth interval are presented: the range of γ and S values in regions of different tectonic activity, the cyclical nature of their changes, and the influence of external natural factors (the Moon, the Sun, solar activity, etc.) on them. According to the results of the longest observations of the LSEM (1995-2006) at the Kavminvodsky test site (seismic hazardous Mineralovodsk region), 3-dimensional models of the anisotropy index were obtained and stress state indicators S were evaluated at different depth levels. It is shown that the nature of the distribution of the anisotropy index continuously varies in depth, laterally, and in time. The cyclical nature of the change in S over time at all depths is revealed. The creation of such 3D models for other particularly important objects will allow us to give a more objective picture of the stress-strain state of the geological environment, which requires, however, longer observations.

Keywords: local seismic and environmental monitoring, PS exchange waves from distant earthquakes, geodynamic indicators of the stress state of the environment.

For citation: Popov M. G., Popova O. V. Study of Changes in Time and in Space of Stressed State of Geological Environment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. 10 (3): 79 – 93. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.43.14.005.

Введение

С позиций геодинамики и оценки сейсмического риска важнейшая характеристика верхней части земной коры – ее напряженно-деформированное состояние. Оценка тектонических полей напряжений и факторов, определяющих энергетику возможных сейсмических событий, существенно влияет на правильность выбора места проектирования и строительства мегаполисов, курортных территорий и особо опасных объектов в аспекте обеспечения их безопасности.

При оценке сейсмической и экологической опасности районов гидро- (ГЭС) и атомных (АЭС) электростанций, предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ),

химической промышленности, стратегически важных объектов и густонаселенных мегаполисов необходим геофизический мониторинг напряженно-деформированного состояния геологической среды, в частности, сейсмический мониторинг [Гамбурцев, 1982]. В густонаселенных урбанизированных районах проведение сейсмического мониторинга с искусственными источниками вызывает много организационных трудностей. Поэтому в настоящее время при проведении мониторинга используются волны от естественных источников. В основном проводят локальный сейсмо-экологического мониторинг (ЛСЭМ) геологической среды [Попова и др., 2008, 2016; Солодилов и др., 1999].

Рассмотрен опыт проведения ЛСЭМ в ряде регионов Российской Федерации с разным геотектоническим режимом (сейсмоопасные зоны, платформы) для определения возможного прогноза напряженного состояния среды при проектировании и строительстве особо опасных объектов, при строительстве высотных зданий в мегаполисах, а также в областях высокой сейсмической опасности, особенно в курортных регионах.

Методика наблюдений и интерпретаций

Проанализированы результаты непрерывного сейсмо-экологического мониторинга в следующих регионах: 1) сейсмоопасные районы (район Кавказских Минеральных вод, районы Геленджика и Камчатки), 2) Московский мегаполис, 3) районы планируемых и действующих особо опасных объектов (Северская АЭС, Кольская АЭС, Белоярская АЭС, Нижегородская АЭС, Тверская АЭС) [Попова и др., 2008, 2016а, б, 2017]. Длительность наблюдения в разных регионах колебалась от 2-3 месяцев до 11 лет в зависимости от задач мониторинга.

Для наблюдения использовались цифровые 3-х компонентные станции типа Дельта-Геон в модификациях 1-3 [Попова и др., 2001, 2008; Солодилов и др., 1999]. Станции Дельта – Геон были укомплектованы сейсмоприемниками СК-1П (собственная частота 1Гц), которые преобразуют механические колебания грунта в электрические и состоят из одной вертикальной компоненты (Z) и двух горизонтальных компонент (X и Y). Компоненты сейсмоприемника ориентировались строго фиксировано и одинаково, горизонтальная компонента X – на север, горизонтальная компонента Y – на восток и вертикальная компонента Z – вверх на зенит. При проведении локального сейсмического мониторинга в указанных выше регионах использовалась площадная расстановка пунктов наблюдения (локальная сеть). Площадь исследования обычно составляла порядка 60*60 км. Оптимальное количество станций на площади сети наблюдений 10-15, но не менее 5-7. Расстояние между станциями составляло 12-20 км, оптимально – 16 км. Во время наблюдений регулярно, обычно один раз в сутки, производилась запись калибровочного импульса определенной формы и амплитуды.

Оценка сейсмической и экологической опасности и напряженно-деформированного состояния геологической среды во времени на основе материалов ЛСЭМ решалась с использованием волн от естественных источников [Попова и др., 2001, 2008, 2016, 2017; Солодилов и др., 1999], в основном на основе записей далеких землетрясений. Оценивались геофизические параметры геологической среды в пространственно-временном аспекте и определялись зоны потенциальной геодинамической опасности (зоны риска).

Была разработана методика¹ обработки записей ЛСЭМ от естественных источников основанная на том, что энергия поперечных и обменных волн PS от далеких землетрясений (обменные волны PS также относятся к волнам поперечным) существенно зависит от степени трещиноватости, пористости, флюидизации и анизотропных свойств среды [Гик, 1997].

Анизотропные свойства среды и ее флюидонасыщенность в свою очередь определяются напряженным состоянием [Stampin, 1978, 1981]. В анизотропной среде распространяются не два, а три типа волн – одна продольная (P) и две поперечные (SV и SH); происходит т.н. расщепление поперечной волны. Волны типа SV и SH различаются по скорости распространения и поляризации. Расщепление поперечной волны является признаком анизотропной среды. Анализ записей обменных волн PS, по-разному поляризованных, типа SV и SH, позволяет изучать анизотропные свойства среды, которые в большой степени определяются ее напряженным состоянием [Stampin, 1978, 1981].

Степень напряженности обусловлена близостью или удаленностью от источников тектонических напряжений: горно-складчатых областей (орогенов), внутри-платформенных глубинных очагов.

Обменные проходящие волны PS от далеких землетрясений с эпицентральными расстояниями $\Delta > 30^\circ$ позволяют изучать среду непосредственно под точкой наблюдения [Померанцева, Мозженко, 1997], поскольку в этом случае лучи, вдоль которых распространяются колебания, близки к вертикали в отличие от взрывов, при которых трудно оценить, на каком участке пути от источника до приемника в среде произошли изменения.

Согласно разработанной методике в каждом пункте наблюдения геодинамического полигона по записям далеких землетрясений оцениваются два показателя:

– γ показатель анизотропности среды (безразмерная величина) под каждой точкой наблюдения: $\gamma = E_R/E_V$, где E_V и E_R – энергия радиальной (PS_V) и тангенциальной (PS_R) составляющих записи обменных волн от далеких землетрясений соответственно.

– S интегральный показатель напряженного состояния среды в районе наблюдения, определяемый расчетным путем на основе изучения распределения параметра γ по площади наблюдательной сети мониторинга [Попова и др., 2008].

Оба показателя являются безразмерными величинами. Показатель анизотропности [Попова и др., 2008] не следует путать с коэффициентом анизотропии χ [Шнеерсон, 2006]. Показатель анизотропности γ позволяет только констатировать наличие в среде анизотропии в большей или меньшей степени.

Для каждого пункта наблюдения исследуемого региона по энергии проходящих обменных волн далеких землетрясений (PS) рассчитывается значение показателя анизотропности γ [Попова и др., 2008] в выбранном диапазоне глубин (диапазоны глубин могут быть разными в зависимости от задач исследований). Далее строятся схемы распределения величины γ по площади исследования, соответствующие разным диапазонам глубин для разных интервалов времени наблюдения. Затем по специальной формуле [Попова и др., 2008] оценивается интегральный показатель напряженного состояния среды S для площади всей расстановки станций наблюдения. В результате можно получать зависимости изменения показателя S во времени

¹ 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>.

и по глубине, а также набор схем распределения показателя γ для различных диапазонов глубин и разных интервалов времени.

Основные результаты изучения геодинимических показателей γ и S

Наиболее длительный непрерывный сейсмо-экологический мониторинг из всех выше перечисленных регионов проводился в регионе Минераловодского выступа (прогностический полигон Кавказских Минеральных Вод) (11 лет), Московского мегаполиса (2 года), Томского полигона (площадка под Северскую АЭС) (около 2-х лет), и Нижегородского полигона (площадка под Нижегородскую АЭС) (1 год). Именно по этим материалам удалось выявить закономерности изменения геодинимических показателей напряженного состояния среды γ и S во времени в разных средах и провести соответствующее обобщение [Попова и др., 2016, 2017, 2018].

Для большей части указанных выше регионов оценки показателей γ и S во времени проведены для одного диапазона глубин равном 0-30 км (согласно задачам исследования) (рис. 1). На основании анализа результатов [Попова и др., 2001, 2008, 2016а, б, 2017, 2018] сделаны следующие выводы:

- геодинимические показатели напряженного состояния в этом диапазоне глубин изменяются во времени в средах разной тектонической активности, однако уровень и контрастность изменений оценочных геодинимических показателей существенно в 100-10 раз отличаются в сейсмоопасных и в асейсмичных (платформенных) регионах [Попова и др., 2016а].

- выявлено влияние внешних природных факторов на изменение геодинимических 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 [Николаев, 1994; Попова, 2007, 2008, 2016; Сытинский, 1989]

- установлена цикличность изменения показателей напряженного состояния среды с периодом 0,5 года и 1,0 год, связанная с изменением скорости вращения Земли, либо с климатическим фактором для регионов любой тектонической активности [Барсуков, 1994; Попова, 2008, 2016а; Шабаров, Тарасов, 2003; Brady, 1974]. Для сейсмоопасных областей выявлена также цикличность, связанная с циклом тектонической активности данного региона.

- разработаны критерии прогноза усиления сейсмической активности в сейсмоопасных регионах [Попова и др., 2008].

Все особенности изменения показателей напряженного состояния среды и амплитудно-частотных параметров микросейсмического фона в разных районах проведения ЛСЭМ позволили сделать вывод о необходимости проведения такого мониторинга на всех стадиях планирования и эксплуатации особо опасных объектов. Причем, в сейсмоопасных регионах такой мониторинг должен быть непрерывным, в платформенных регионах может быть циклическим. Выявленные среднесрочные критерии усиления сейсмической активности позволят заблаговременно оценить возможную опасность для предотвращения техногенных катастроф.

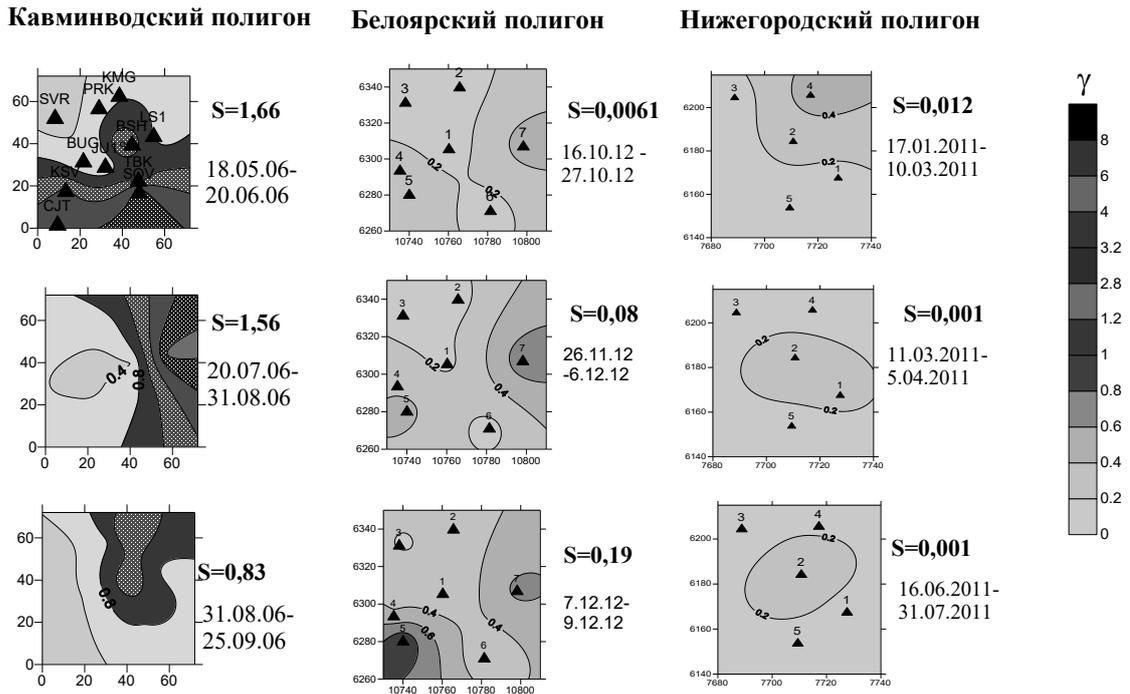


Рис. 1. Схемы распределения показателя анизотропности γ для Кавминводского, Белоярского и Нижегородского полигонов в разные интервалы времени для интервала глубин 0-30 км.

1 – пункты наблюдения. /

Fig. 1. Distribution schemes of the anisotropy index γ for the Kavminvodsky (on left), Beloyarsky (centered) and Nizhny Novgorod (on right) test sites at different time intervals for the depth interval 0-30 km 1 – observation points.

Для Кавминводского, Кольского и Нижегородского полигонов проведена оценка показателей напряженного состояния геологической среды γ и S для более дробного разбиения среды на глубинные интервалы [Попова и др., 2017, 2018]. Но только для Кавминводского полигона удалось выявить закономерности изменения показателей напряженного состояния геологической среды с глубиной, поскольку наблюдения мониторинга в этом регионе были самые длительные.

Изучение 3-хмерного распределения показателей анизотропности среды γ и напряженного состояния среды S в районе Кавминводского сейсмоопасного полигона

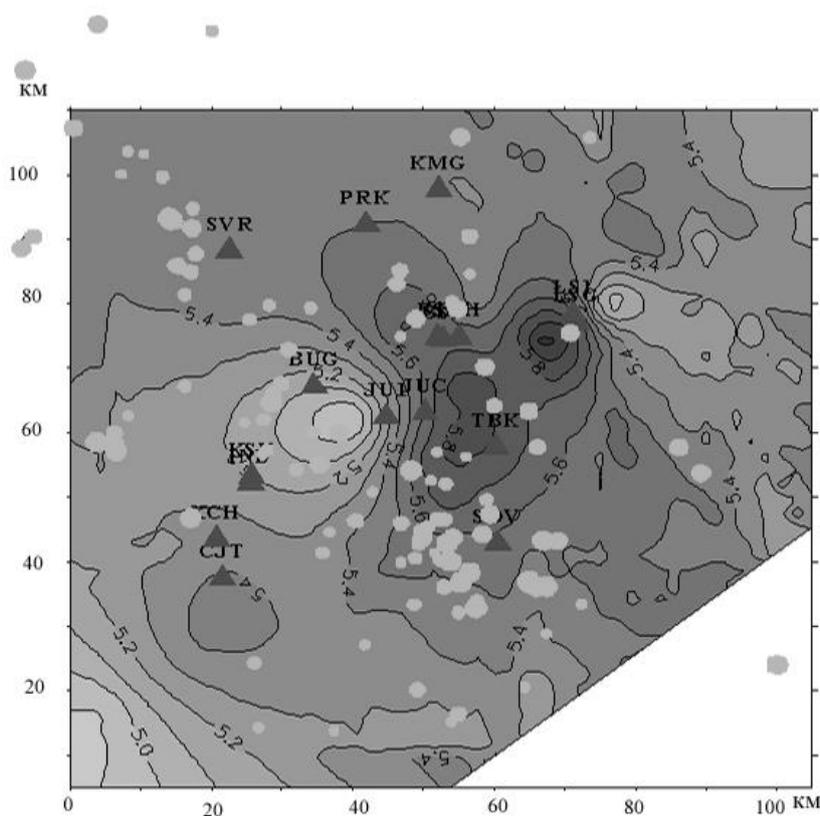
Кавминводский полигон расположен в сейсмоопасном густонаселенном курортном регионе Кавказских Минеральных Вод. Поэтому изучение его напряженного состояния и оценки сейсмической опасности во времени является очень важным. Изучение распределения показателей γ и S во внутренних точках среды и связь их с глубинным строением в районе Кавказских Минеральных Вод является примером для таких детальных исследований в других сейсмоопасных районах и в районах расположения особо опасных объектов.

Район Кавказских Минеральных вод сейсмически активен и относится к зоне, где возможны 7-8-мибалльные землетрясения (по шкале MSK) [Милановский и др., 1989]. Региональные материалы безусловно свидетельствуют о том, что сейсмич-

ность в этом районе мелкофокусная, коровая. На картах распределения эпицентров землетрясений по глубинам, видно, что очаги ниже 20-25 км здесь практически отсутствуют. Очевидно, что все современные деформации связаны с распределением напряжений в самой верхней части литосферы, где идут перемещения и взаимодействие относительно небольших блоков.

Скоростное строение Кавминводского полигона

Скоростное строение среды Кавминводского полигона определялось по записям Р-волн от далеких землетрясений, зарегистрированных при сейсмо-экологическом мониторинге, методом сейсмической томографии [Аки et al., 1977]. На территории полигона на начальном этапе наблюдений (первые 2-3 года) регистрация далеких землетрясений осуществлялась с помощью 15-16 трехкомпонентных цифровых станций, а далее количество станций было уменьшено до 10-12. Учитывались временные задержки Р-волн от регионального годографа с применением метода сейсмической томографии [Солодилов и др., 1999]



Условные обозначения / Legends

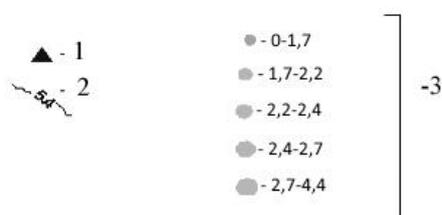


Рис. 2. Скоростное строение среды в слое 0-7 км (Кавминводский полигон).

1 – пункты наблюдения, 2 – изолинии скорости, 3 – эпицентры местных землетрясений с разными магнитудами ($M = 0-4,4$).

Fig. 2. The velocity structure of the medium in the 0-7 km stratum (Kavminvodsky test site). 1 – observation points, 2 – velocity isolines, 3 – epicenters of local earthquakes with different magnitudes ($M = 0-4.4$).

В верхней части земной коры (0-7 км) определена резко-контрастная изометричная высокоскоростная структура, простирающаяся в направлении С-СЗ – Ю-ЮВ (рис. 2). 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, т.к. она протягивается за пределы района исследований. Поперечные размеры высокоскоростной структуры изменяются от 20 до 30 км. На глубинах более 30 км имеет место низкоскоростная кора и достаточно контрастная по скоростям верхняя мантия до глубин 84 км. На скоростном разрезе в крест простирания высокоскоростной структуры 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 в большей мере тяготеют к внешним частям высокоскоростной структуры (рис. 2) [Попова и др., 2001]. В связи с этим важно отметить, что ранее при анализе особенностей строения земной коры сейсмоактивных районов по материалам ГСЗ [Егоркин, 1991; Крылов и др., 1993; Попова и др., 1998], было показано, что очаги сильных землетрясений (Газлийского, Спитакского, Казанджигского, Дагестанского и др.) также приурочены к периферийным (градиентным) зонам высокоскорост-

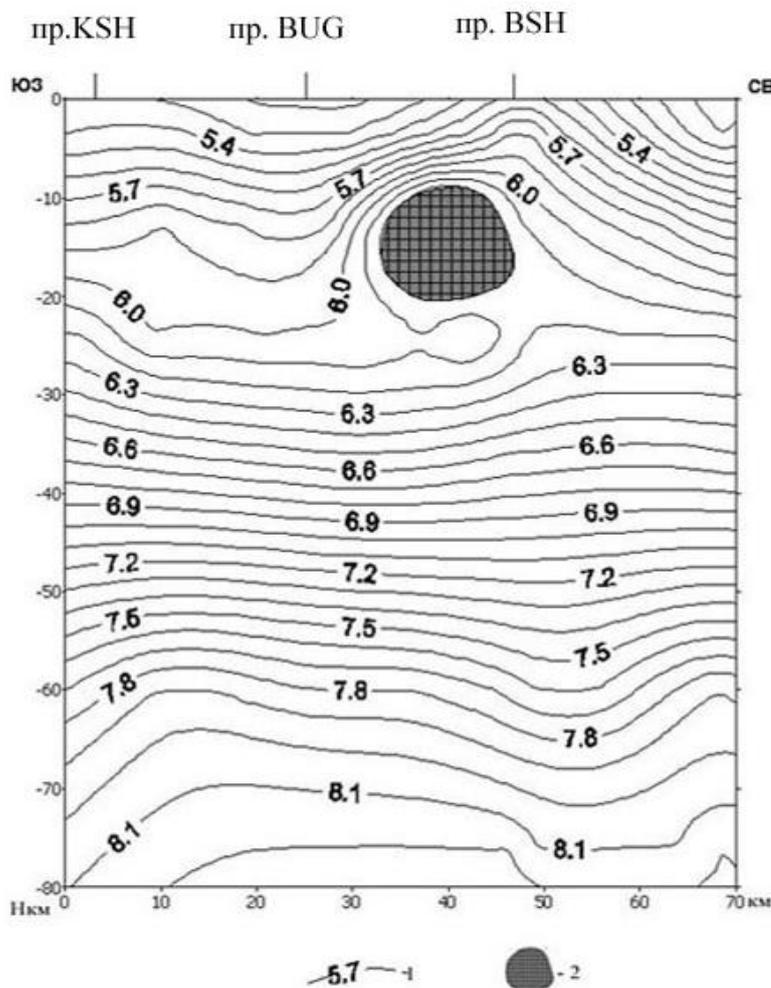


Рис. 3. Скоростной разрез в крест простирания высокоскоростной структуры (пр. KSH, пр. BUG, пр. BSH – проекции пунктов наблюдения на линию профиля). 1 – изолинии скорости, 2 – высокоскоростное ядро. / Fig. 3. Velocity profile into across the strike of a high-velocity structure (KSH pr., BUG pr., BSH pr. – projection of observation points onto the profile line). 1 – velocity isolines, 2 – high-velocity core.

ных структур консолидированной коры. Таким образом, наблюдается связь сейсмогенерирующего объема активизированной коры с определенным типом коровых структур – куполовидными, возможно диапировыми образованиями, содержащими высокоскоростные ядра, что отвечает представлениям Гамбурцева Г. А. [Гамбурцев, 1982] и Добровольского И. П. [Добровольский, 1991; Dobrovolsky et al., 1979] о свойствах сейсмогенной коры.

Согласно теории Добровольского И. П. [Добровольский, 1991] и других авторов [Scholz et al., 1973] 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 [Егоркин, 1991; Попова, 1998].

Рассматриваемый район Кавминвод по типу 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 сейсмических событий. Горизонтальные размеры высокоскоростной структуры, выявленной на территории Кавминводского полигона в крест простирания не превышают 30 км, и маловероятно, чтобы эта структура смогла накопить энергию, способную вызвать катастрофическое землетрясение. Это подтверждают и результаты изучения местной сейсмической активности, максимальные величины магнитуд (M) не превышают 5,1-5,3 [Милановский, 1989].

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

Трехмерное распределение показателей напряженного состояния

Для изучения характера изменения показателя анизотропности γ по глубине и во времени для 26 интервалов наблюдения (см. табл. 1) были построены 3-х мерные модели показателя анизотропности γ . Эти 26 интервалов наблюдения соответствуют 3-м годам непрерывных наблюдений, в течение которых на территории Кавминводского полигона работало максимальное количество цифровых станций (около 15). Кроме того, в течение этого периода наблюдения не отмечалось влияния такого внешнего природного фактора как далекое катастрофическое землетрясение [Попова и др., 2007], которое могло бы существенным образом изменить показатели анизотропности γ и напряженного состояния S , вызвав при этом активизацию местной сейсмической активности. Можно считать, что в течение указанных 3-х лет напряженное состояние среды определялось только местными тектоническими процессами.

Полученные 3-х мерные модели показателя γ приведены на рисунке 3 для 8-ми интервалов наблюдения. Как видно из рисунка, характер распределения показателя анизотропности по площади полигона непрерывно изменяется по глубине, по латерали и во времени. В интервалах времени с 1 по 10 (примерно 1,5 года наблюдений) на глубинах до 10 км значения показателя γ малы ($<0,8$), среда на глубинах 0-10 км

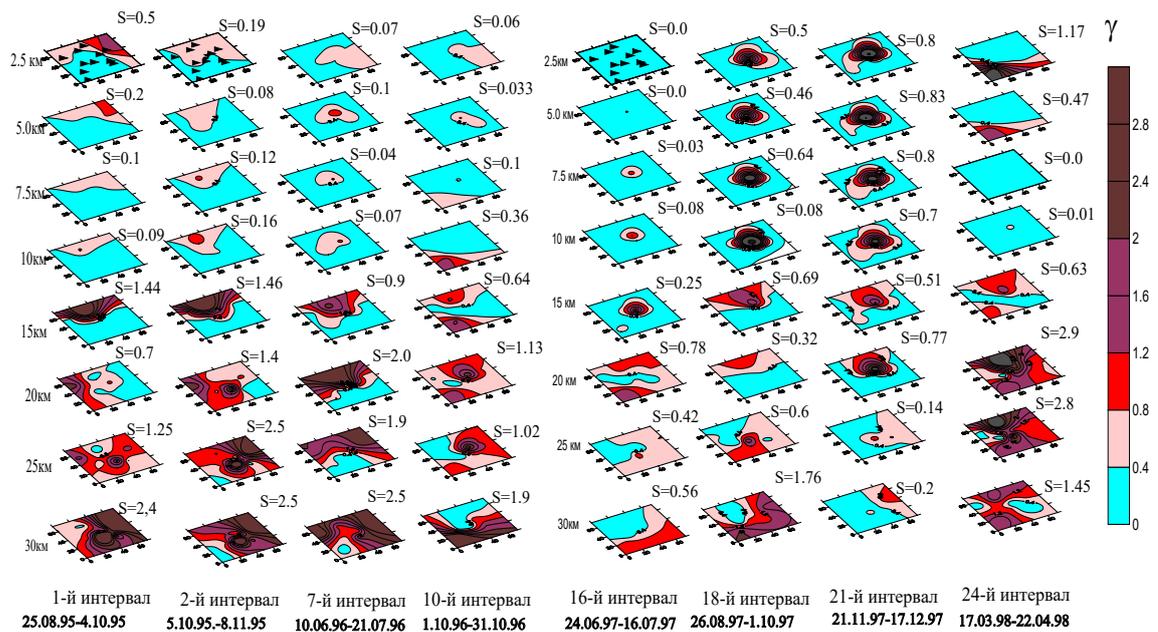


Рис. 4. Трехмерные модели распределения показателя анизотропности γ (Кавминводский полигон). /

Fig. 4. Three-dimensional distribution models of the anisotropy index γ (Kavminvodsky test site).

From left to right – observation intervals: 1st, 2nd, 7th, 10th, 16th, 21st and 24th.

практически изотропна. Глубины более 15 км отличаются повышенными значениями показателя γ (1,6-2,8).

Начиная с 16-го интервала наблюдений на глубинах 7,5-15 км в области ядра куполообразной высокоскоростной структуры образуется локальный очаг повышенных значений показателя анизотропности γ (рис. 4).

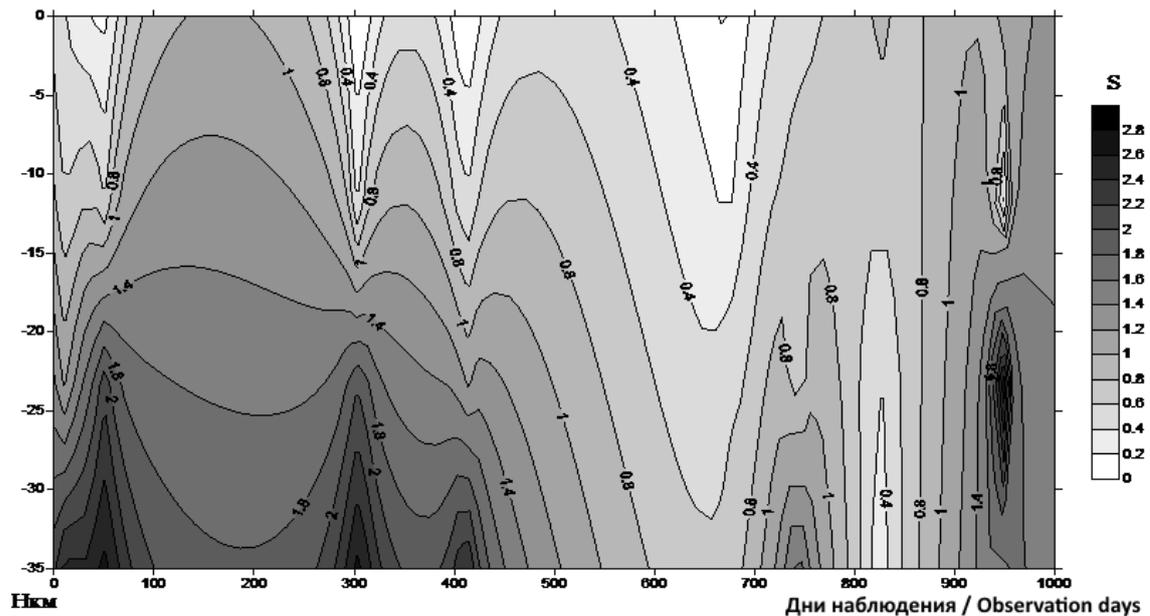


Рис. 5. Изменение показателя напряженного состояния S во времени и по глубине. /

Fig. 5. The change in the stress state index S in time and in depth.

Таблица 1. / Table 1.

Временные интервалы наблюдения, для которых были построены 3-хмерные модели распределения показателя анизотропности γ . / Observation time intervals for which 3-dimensional models of the distribution of the anisotropy index γ were constructed.

№ временного интервала / No. of time interval	Время наблюдений / observation time	№ временного интервала / No. of time interval	Время наблюдений / observation time
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

Этот очаг увеличивается в размерах, распространяется до приповерхностной части геологической среды и становится очень «интенсивным» (значения γ более 2,8) (21-й интервал наблюдений) (рис. 3), что указывает на возрастание напряженного состояния на глубинах (0–10) км. При этом значения показателя γ на глубинах более 15 км существенно ослабевают.

Перед 24-м интервалом времени в районе изучаемого полигона произошло резкое изменение характера 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 γ резко возрастают (рис. 4).

Для каждого интервала наблюдения для всех схем распределения показателя γ , соответствующих разным глубинным уровням, был рассчитан показатель напряженного состояния S и построена зависимость изменения этого параметра по глубине и во времени (рис. 5). Из рисунка видна цикличность в изменении напряженного состояния во времени на всех глубинах. Выделяется временной интервал (0-500 дней), когда среда находится в напряженном состоянии. Причем, напряжение распространяется снизу вверх. Далее выделяется интервал, когда в среде напряженность отсутствует (500-700 день наблюдения), ослабление напряжения распространяется сверху вниз. А с 700 дня наблюдения среда вновь находится в напряженном состоянии, однако в данном случае повышенное напряженное состояние характерно для всего разреза.

Выводы

Таким образом, по данным проходящих обменных волн PS от далеких землетрясений в районе геодинамического полигона Кавказских Минеральных Вод получены 3-х мерные модели показателя анизотропности γ . Установлено, что характер распределения показателя анизотропности по площади полигона непрерывно изменяется по глубине, латерали и во времени. Выявлена цикличность в изменении показателя напряженного состояния среды на всех глубинах изучаемой среды. Среда как бы «дышит», периоды напряженного состояния сменяются отсутствием напряжения в среде. Причем, в это «дыхание» вовлечены все уровни исследуемых глубин от поверхности до глубины 30 км.

Из приведенных данных следует, что длительный локальный сейсмо-экологический мониторинг позволяет оценивать напряженное состояние среды во времени и пространстве. Аналогичные (выше приведенным) длительные исследования ЛСЭМ рекомендуется проводить во всех сейсмоопасных регионах, в районах проектирования АЭС, ГЭС и стратегически важных объектов, а также в густонаселенных мегаполисах с целью оценки тектонических полей напряжений и факторов, определяющих энергетику возможных сейсмических событий.

Литература

1. Барсуков О.М. Годичные вариации сейсмичности и скорости вращения Земли. // Физика Земли. – 1994. – №4. – С. 96-98.
2. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
3. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. №4. – С. 804-815.
4. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ РАН СССР, 1991. – 216 с.
5. 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.
6. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р. Детальные сейсмические исследования литосферы на Р и S волнах. – Новосибирск: Наука, 1993. – 199 с.
7. Милановский Е.Е., Расцветаев А.В., Кухмазов С.У., Бирман А.С. и др. Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа. // В сб.: Геодинамика Кавказа. – М.: Наука, 1989. – С. 99-105.
8. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. – М.: Наука, 1994. – 222 с.
9. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земли. – М.: Недра, 1997. – 256 с.
10. 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. – С. 178-189.
11. Попова О.Г., Коновалов Ю.Ф., Кухмазов С.У. Технология и результаты геодинамического мониторинга с применением локальной сети сейсмических станций. // Материалы международной конференции «Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов». – Воронеж. – 2001. – С. 164-166.
12. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Неядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние среды удаленных территорий. Геофизика

XXI столетия: 2006 г. // В сборнике трудов восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. – М. – 2007. – С. 200-204.

13. 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.

14. Попова О. Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В., Васютинская С.Д. Основные результаты по локальному сейсмо-экологическому мониторингу в разных регионах Российской Федерации. // Геоэкология. – 2016а. – №6. – С. 483-496.

15. Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В., Лаврик Е.В., Изучение геодинамики и оценка напряженного состояния среды в районе проектируемой Нижегородской АЭС по материалам сейсмо-экологического мониторинга. // Материалы Сергеевских чтений, выпуск 18. Инженерная геология. Геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. – М.: РУДН, 2016б. – С. 193-197.

16. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько 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.

17. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Неядько В.В. Оценка геодинамики платформенных территорий по результатам сейсмо-экологического мониторинга. // Геоэкология. – 2018. – №4. – С. 40-52.

18. 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.

19. Сыгинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью. // Физика Земли. – 1989. – №2. – С. 13-21.

20. Шабаров А.П., Тарасов Б.Г. Геодинамическое состояние массива горных пород в циклах Земли и Солнца. // Тезисы докладов «Пятые геофизические чтения имени В.В. Федынского» 2003 г. – М.: Центр Геон им. В.В. Федынского, 2003. – С. 51-52.

21. Шнеерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. – М.: ГЕРС, 2006. – 160 с.

22. 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.

23. Brady B. T. Theory of Earthquake. // Pageophys. – 1974. – Vol. 112. No. 4. – 701 p.

24. 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.

25. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. // Wave motion IVO. – 1981. – No. 3. – pp. 343-391.

26. 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.

27. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis. // Science. – 1973. – Vol. 181. – pp. 803-809.

References

1. Barsukov O. M. Annual variations of seismicity and speed of rotation of the Earth. Physics of the Earth. 1994. No. 4. pp. 96-98. (In Russ.)

2. Gamburtsev A. G. Seismic monitoring of a lithosphere. Moscow. Science. 1982. 200 p. (In Russ.)

3. Gik L. D. Physical simulation of seismic wave propagation in porous and fractured media. Geology and geophysics. 1997. T. 38. No. 4. pp. 804-815. (In Russ.)

4. Dobrovolsky I. P. Theory of preparation of a tectonic earthquake. Moscow. IFZ Academy of Sciences of the USSR. 1991. 216 p. (In Russ.)

5. Egorkin A. V. The structure of crust on seismic geotraverses. In the book: Deep structure of the territory of an USSR. Edition V. V. Belousov, N. I. Pavlenkova, G. I. Kvetkovskaya. Moscow. Science. 1991. pp. 118-135. (In Russ.)
6. Krylov S. V., Mishenkin B. P., Mishenkina Z. R. Detailed seismic researches of a lithosphere on P and S waves. Novosibirsk. Science. 1993. 199 p. (In Russ.)
7. Milanovsky E. E., Rastsvetayev A. V., Kukhmazov S. U., Birman A. S., etc. The newest geodynamics of the Elbrus and Mineralnye Vody region of North Caucasus. In the book: Geodynamics of the Caucasus. Moscow. Science. 1989. pp. 99-105. (In Russ.)
8. Nikolayev A. V. Problems of induced seismicity. The induced seismicity. Moscow. Science. 1994. 222 p. (In Russ.)
9. Pomerantseva I. V., Moszhenko A. N. Seismic research with Earth equipment. Moscow. Nedra. 1997. 256 p. (In Russ.)
10. Popova O. G., Konovalov Yu. F., Popov M. G. Features of structure of crust of seismodangerous and aseismic regions according to geotraverses (on the example of the Basalt profiles, Rubin, Quartz and Armash-Akhaltzikhe). *Volcanology and seismology*. 1998. No. 4. pp. 178-189. (In Russ.)
11. Popova O. G., Konovalov Yu. F., Kukhmazov S. U. Technology and results of geodynamic monitoring using a local network of seismic stations. Materials of the international conference "Modern geodynamics, depth structure and seismicity of platform territories and adjacent regions". Voronezh. 2001. pp. 164-166. (In Russ.)
12. Popova O. G., Grey A. V., Konovalov Yu. F., Nedyadko V. V. Influence of catastrophic earthquakes on tension of the environment of remote territories. *Geophysics of the XXI century: 2006. The collection of works of the eighth geophysical readings of V. V. Fedynsky*. Moscow. 2007. pp. 200-204. (In Russ.)
13. Popova O. G., Grey A. V., Konovalov Yu. F. Results of long-term seismic monitoring in the seismodangerous Region of Caucasus Mineralnye Vody region. *Geoecology*. 2008. No. 2. pp. 135-140. (In Russ.)
14. Popova O. G., Popov M. G., Arakelyan F. O., Nedyadko V. V., Vasyutinskaya S. D. The main results on local seismo – to environmental monitoring in different regions of the Russian Federation. *Geoecology*. 2016a. No. 6. pp. 483-496. (In Russ.)
15. Popova O. G., Popov M. G., Arakelyan F. O., Nedyadko V. V., Lavrick E. V., Study of geodynamics and assessment of the stressed state of the environment in the area of the designed Nizhny Novgorod NPP based on the materials of seismic-ecological monitoring. Materials of Sergei readings, issue 18. *Engineering geology. Geoecology. Fundamental problems and applications*. Moscow. Russian Peoples Friendship University. 2016b. pp. 193-197. (In Russ.)
16. 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. (In Russ.)
17. Popova O. G., Makeev V. M., Popov M. G., Arakelyan F. Shch., Nedyadko V. V. Assessment of geodynamics of platform territories by results of seismo-ecological monitoring. *Geoecology*. 2018. No. 4. pp. 40-52. (In Russ.)
18. Solodilov L. N., Popova O. G., Konovalov Yu. F. A possibility of monitoring of a condition of crust with use of records of far earthquakes. *Investigation and protection of a subsoil*. 1999. No. 11. pp. 51-53. (In Russ.)
19. Sytinsky A. D. On Connection of Earthquakes with Solar Activity. *Physics of the Earth*. 1989. No. 2. pp. 13-21. (In Russ.)
20. Shabarov A. P., Tarasov B. G. Geodynamic state of rock mass in Earth and Sun cycles. Theses of the reports "Fifth geophysical readings named after V. V. Fedynsky". Moscow. Center of Geon named after V. V. Fedynskogo. 2003. pp. 51-52. (In Russ.)
21. Schneerson M. B. Introduction to seismic anisotropy: theory and practice. Moscow. GERS. 2006. 160 p. (In Russ.)

22. 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.
23. Brady B. T. *Theory of Earthquake*. Pageophys. 1974. Vol. 112. No. 4. 701 p.
24. 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.
25. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave motion IVO*. 1981. No. 3. pp. 343-391.
26. 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.
27. Scholz C. H., Sykes L. R., Aggarwal Y. P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*. 1973. Vol. 181. pp. 803-809.