

УДК 55:504.75:550.348

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ЛОКАЛЬНОМУ СЕЙСМО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ В РАЗНЫХ РЕГИОНАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2016 г. О.Г. Попова*, М.Г. Попов**, Ф.О. Аракелян***,
В.В. Недядько***, С.Д. Васютинская*

* Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,

Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: oksana-p@list.ru

** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия. E-mail: mgpopov@list.ru

*** ООО «Атомсейсмоизыскания»,

ул. Скаковая, 32, корп. 2, Москва, 125040 Россия. E-mail: asi_47@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2016 г.

Представлено обобщение результатов сейсмо-экологического мониторинга от естественных источников в разных по своей тектонической активности регионах Российской Федерации. Разработана методика оценки напряженного состояния среды по энергетическим характеристикам обменных волн PS от далеких землетрясений. По данным длительного непрерывного мониторинга оценены значения геодинамических показателей напряженного состояния среды для разных по своей тектонической активности сред, выявлены основные закономерности изменения геодинамики среды, установлено наличие цикличности геодинамических показателей. По характеристикам микросейсмического фона показано влияние внешних природных факторов (Луны, Солнца, солнечной активности и т.д.) на геологическую среду, которое существенно отличается в сейсмоопасных и асейсмичных платформенных регионах.

Ключевые слова: сейсмо-экологический мониторинг, обменные волны PS от далеких землетрясений, напряженное состояние среды, микросейсмический фон.

Науки о Земле имеют широкий спектр методов изучения процессов, происходящих как в глубинах, так и на поверхности Земли. Сложение ритмов разной природы (например, влияния Солнца, Луны, планет) может привести к резонансам, вызывающим катастрофы. Поскольку геологическая среда неоднородна и состоит из твердых частиц, пустот, флюидов, слоев, блоков и т.п. с разным напряженным состоянием, то ритмы и катастрофы передаются по-разному и фиксируются в породах неодинаково. Для изучения этих процессов необходим геофизический мониторинг и, как частный случай, сейсмический мониторинг.

Сейсмическим мониторингом называются длительные непрерывные или циклические (периодические) наблюдения за изменениями сейсмических параметров определенного участка геологической среды. Он базируется на организации сети непрерывных долговременных (или периодических) наблюдений на исследуемой территории, оперативной обработке и интерпретации

сейсмических данных с выходом на прогнозные оценки.

В последние годы остро встал вопрос о безопасности жизненно важных технических объектов, таких как ГЭС, АЭС и недропользования. Появляется понятие экологического мониторинга. Прежде всего это относится к крупным и экологически опасным объектам, территориям эксплуатируемых нефтегазовых месторождений, угольным бассейнам, трассам магистральных трубопроводов, захоронениям высокотоксичных РАО, крупным химическим предприятиям, особо охраняемым эколого-курортным территориям, городским агломерациям с высокой плотностью населения, расположенных в районах высокого сейсмического риска.

Задачи, поставленные перед экологическим мониторингом, в большой степени решаются с помощью локального сейсмического мониторинга, поскольку он позволяет отслеживать во времени изменение геофизических параметров среды. Таким образом, локальный сейсмический

мониторинг, который позволяет во времени оценивать состояние геофизической среды на ограниченных территориях с целью оценки степени экологической опасности и уменьшения риска опасных природных явлений, можно назвать сейсмоэкологическим мониторингом.

Результаты локального сейсмо-экологического мониторинга используются и в научных целях: для изучения внутреннего строения Земли, физических свойств вещества недр и т. д.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ

В густонаселенных урбанизированных районах проведение сейсмо-экологического мониторинга с искусственными источниками (взрывами) вызывает много организационных трудностей, поэтому встал вопрос об использовании сейсмического мониторинга, регистрирующего волны от естественных источников. В основном используются записи далеких землетрясений и записи микросейсмического фона.

В течение последних 15 лет в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) изучаются проблемы, связанные с геодинамикой среды во времени в разных регионах России. Регионы, по которым анализировались материалы локального сейсмо-экологического мониторинга, можно разделить на три категории: 1) сейсмоопасные зоны, 2) урбанизированные территории мегаполисов, 3) особо важные объекты (например, атомные электростанции).

К рассмотренным сейсмоопасным регионам относятся район Кавказских Минеральных Вод, район Олюторского землетрясения на Камчатке и район южной части о. Сахалин. В качестве мегаполиса рассмотрены материалы сейсмо-экологического мониторинга Москвы и Подмосковья. Особо опасные и технически сложные объекты, на которых проводился локальный сейсмо-экологический мониторинг – это Томский регион (Северская АЭС), Нижегородская область (Нижегородская АЭС), Среднеуральский регион (Белоярская АЭС) и Кольский регион (Кольская АЭС). Регионы Томский и Среднеуральский относятся к сейсмоопасным территориям со слабой и умеренной сейсмической активностью, в то время как Нижегородская область – это платформенный асейсмичный регион. Район Кольской АЭС – щит, для которого характерна активизация сейсмической активности. Длительность наблюдения колебалась от 2–3 месяцев до 11 лет в зависимости от задач мониторинга.

Сейсмо-экологический мониторинг в вышеупомянутых регионах проводился от естественных источников (далекие землетрясения и микросейсмический фон). Использовались 3-компонентные сейсмические станции типа РСС «Дельта-Геон» в модификациях 1–3 [<http://www.logsys.ru>], 3-компонентный сейсмоприемник СП-1К с одной вертикальной (Z) и двумя горизонтальными (X и Y) компонентами. Компоненты сейсмоприемника ориентировались строго фиксированно 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 применялась площадная расстановка пунктов наблюдения (локальная сеть), состоящая из 3-компонентных сейсмических станций. Площадь исследования обычно порядка 60×60 км². Оптимальное количество станций на площади в среднем 10–15, но не менее 5. Расстояние между станциями 12–20 км, оптимально – 16 км. Во время наблюдений регулярно, обычно один раз в сутки, проводилась запись калибровочного импульса определенной формы и амплитуды.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Способ оценки напряженного состояния и изучения геодинамики среды разработан на основе анализа энергии обменных проходящих волн PS от далеких землетрясений по материалам длительного локального сейсмического мониторинга в районе Кавминвод (1995–2006 гг.) и подробно описан в работе [8].

Обменные проходящие волны PS от далеких землетрясений с эпицентрными расстояниями $\Delta > 30^\circ$ позволяют изучать среду непосредственно под точкой наблюдения [7], 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.

Методика основана на том, что энергия поперечных и обменных волн PS (а обменные волны также относятся к волнам поперечным) существенно зависит от степени трещиноватости, пористости, флюидизации и анизотропных свойств среды [4]. Анизотропные свойства среды и ее флюидонасыщенность в свою очередь определя-

ются напряженным состоянием [20, 21]. В анизотропной среде распространяются не два, а три типа объемных волн: одна продольная (P) и две поперечные (SV и SH); происходит 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 [20, 21].

Оценка напряженного состояния среды проводится по энергии обменных проходящих волн PS для разных интервалов времени наблюдения. Величина интервала времени колеблется от 12 до 40 суток (в среднем 1 месяц) в зависимости от качества записи далеких землетрясений. Согласно разработанной методике, напряженное состояние среды в некоторой точке пространства оценивается следующими показателями [8]:

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

– интегральным показателем напряженного состояния среды S (безразмерная величина) в районе наблюдения, определяемого расчетным путем на основе изучения распределения параметра γ по площади наблюдательной сети мониторинга в каждом интервале времени наблюдения.

Для каждого пункта наблюдения строятся зависимости показателя анизотропности среды от времени

наблюдения $\gamma(t)$. Кроме того, для разных интервалов наблюдения строятся схемы распределения величины $\gamma = E_R/E_V$ по площади исследования, и оценивается интегральный показатель напряженного состояния среды S для каждого интервала времени.

Таким образом, в результате обработки записей обменных волн PS от далеких землетрясений получают временные ряды: $E_V(t)$, $E_R(t)$, $\gamma(t)$ для каждого пункта наблюдения и $S(t)$ для всей площади сети станций, а также набор схем распределения параметра γ для разных интервалов времени.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБМЕННЫХ ВОЛН PS, ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНИЗОТРОПНОСТИ γ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ S В РЕГИОНАХ РАЗНОЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Предложенная методика оценки напряженного состояния среды использовалась при обработке всех экспериментальных материалов, перечисленных выше.

Цели исследований:

- показать, как изменяются геодинамические показатели напряженного состояния среды во времени в каждом из исследуемых регионов, оценить диапазон изменения этих показателей в средах сейсмически активных и асейсмичных;
- установить наличие цикличности в изменении геодинамических показателей;
- выявить критерии прогноза усиления сейсмической опасности;

Таблица 1. Геодинамические характеристики среды (Кавминводский геодинамический прогностический полигон)

Год проведения исследований	Границы интервалов	Показатель анизотропности среды $\gamma = E_R/E_V$	Интегральный показатель напряженного состояния среды S
2000	20.05.00–15.06.00	0.2–2.4	1.35
2001	23.03.01–03.05.01	0.2–1.2	0.63
2002	22.09.01–21.10.01	0.2–2.4	1.7
	09.05.02–15.06.02	0.2–1.0	0.4
2004	25.07.04–19.09.04	0.2–2.8	2.6
	23.09.04–23.10.04	0.2–2.4	2.1
	24.10.04–24.11.04	0.2–2.0	0.9
2005	01.04.05–16.04.05	0.2–8.0	5.3
2006	18.05.06–20.05.06	0.2–2.0	0.8

Таблица 2. Геодинамические характеристики среды (Томский полигон)

Год проведения исследований	Границы интервалов	Показатель анизотропности среды $\gamma = E_R/E_V$	Интегральный показатель напряженного состояния среды S
2008	11.07.08–31.07.08	0.0–0.8	0.149
	27.08.08–10.09.08	0.0–0.4	0.001
	11.09.08–10.10.08	0.0–0.8	0.04
	11.10.08–10.11.08	0.0–0.6	0.017
2009	03.01.09–25.01.09	0.0–0.6	0.001
	20.01.09–10.02.09	0.0–0.8	0.074
	04.04.09–17.04.09	0.0–1.0	0.126
	18.04.09–12.05.09	0.0–1.0	0.16
	14.05.09–20.06.09	0.0–0.6	0.017
	05.09.09–29.09.09	0.0–0.4	0.003
2010	12.12.00–10.01.10	0.0–1.4	0.18
	06.02.10–25.02.10	0.0–0.6	0.000
	26.02.10–04.03.10	0.0–2.8	0.542
	05.03.10–14.03.10	0.0–0.8	0.003

Таблица 3. Геодинамические характеристики среды (Нижегородский полигон)

Год проведения исследований	Временные границы интервалов наблюдения	Показатель анизотропности среды $\gamma = E_R/E_V$	Интегральный показатель напряженного состояния среды S
2011	17.01.11–31.07.08	0–0.4	0.012
	11.03.11–05.04.11	0–0.2	0
	16.06.11–31.07.11	0–0.2	0.001
	01.09.11–21.10.11	0–0.6	0.061
	21.10.11–07.11.11	0–0.4	0.0015

ков аномального напряженного состояния горных пород в пределах территории полигона [13]. И как результат возникновения контрастной аномалии 05.02.2010 г. в районе Томского полигона (территория Северской АЭС) произошло слабое местное тектоническое землетрясение с магнитудой $M = 1.4$, эпицентр которого приурочен к краевой части выделенной аномалии.

Таким образом, в регионах слабой сейсмической активности также могут возникать ситуации повышенной напряженности среды, в результате разрядки которой могут происходить слабые местные землетрясения.

Для платформенного Нижегородского региона [15] значения показателя анизотропности γ варьировали от 0 до 0.6, а показателя напряженного состояния S – от 0 до 0.061 (см. табл. 3, рис. 1).

Максимальные значения величины S для сейсмоопасного региона Кавминвод более чем в 10 раз превышают максимальные значения этого показателя для слабо сейсмически активного Томского полигона исследований и в 100 раз – для асейсмичного Нижегородского полигона. Такое соотношение величин сравниваемых параметров, полученных для трех полигонов, предполагает существенное различие геодинамики и напряженного состояния среды в этих регионах.

Однако результаты сейсмического мониторинга на территории Московского мегаполиса (платформенный регион) за 2 года исследований (см. табл. 4) разительно отличаются от данных по платформенному Нижегородскому полигону (см. табл. 3). На территории Московского поли-

Таблица 4. Геодинамические характеристики среды (Московский геодинамический прогностический полигон)

Год проведения исследований	Временные границы интервалов наблюдения	Показатель анизотропности среды $\gamma = E_R/E_V$	Интегральный показатель напряженного состояния среды S
1997	04.02.97–05.04.97	0–1.2	1.036
	06.04.97–02.06.97	0–0.8	0.38
	26.06.97–27.07.97	0–2.4	0.91
	28.07.97–20.09.97	0.2–1.2	1.42
	01.10.97–05.11.97	0–0.1	0
	06.11.97–02.12.97	0–0.8	0.217
1998	03.12.97–10.01.98	0.2–2.0	2.08
	11.01.98–22.02.98	0.2–2.8	1.79
	23.02.98–23.03.98	0–0.8	0.532
	23.03.98–12.04.98	0–0.4	0.81
	13.04.98–12.05.98	0–0.4	0.218
	14.05.98–23.05.98	0–0.4	0.133
	25.05.98–20.06.98	0–0.4	0.11
	21.06.98–0.07.98	0–0.4	0.225
	21.07.98–5.08.98	0–1.2	1.5
	26.08.98–.09.98	0–0.8	0.71
	10.09.98–.11.98	0–0.8	0.276

гона за время наблюдений возникали контрастные области с высокими значениями коэффициента анизотропности γ до 2.0–2.8, при этом показатель S соответственно возрастал до значений 1.5–2.08. Вероятно, Московский регион нельзя назвать регионом пассивной геодинамики. Геодинамические оценочные показатели γ и S для Московского региона достаточно высокие и ближе к показателям слабо сейсмоактивного Томского региона. Это позволяет предположить достаточно высокую степень геодинамической активности района Московского мегаполиса, которую следует учитывать при строительстве высотных зданий и важных промышленных объектов.

Цикличность, наблюдаемая по оценке энергетических параметров волн PS и по значениям геодинамических показателей γ и S во времени

Анализ результатов длительного сейсмо-экологического мониторинга для района Кавказских Минеральных Вод и Московского региона показал, что на временных рядах значений энергии обменных волн $E_V(t)$ и $E_R(t)$ (соответственно радиальной и тангенциальной компонент) на всех пунктах наблюдения выявляется четкая периодичность изменения указанных параметров для разных уровней глубин (рис. 2а, б). Период

этих изменений равен примерно 170–200 сут., в среднем 180–185 сут., т.е. 0.5 года. Для Кавминводского региона контрастность полугодовой периодичности выше на глубинах (0–15 км) и ослабевает на больших глубинах (15–30 км) (рис. 2а). В платформенном районе Московского мегаполиса наибольшая контрастность изменения энергии обменных волн соответствует большим глубинам порядка 15–30 км, т.е. эти глубины более чувствительны к полугодовым изменениям напряженного состояния. Этот факт требует дальнейших наблюдений и подтверждения. Полугодовая цикличность проявляется и в зависимостях $\gamma(t)$ и $S(t)$ для этих регионов (рис. 2з). Природа полугодовой цикличности, по мнению ряда исследователей, вероятно, обусловлена изменением скорости вращения Земли [2, 16, 18]. Однако не исключено и влияние сезонного фактора [16].

Зависимость $S(t)$ для района Кавминводской сети позволила выявить низкочастотную цикличность изменения показателя напряженного состояния, связанную с подготовкой сильных для этого района землетрясений с магнитудой $M \geq 4.3$. Длительность циклов составляет 2–3 года [8], каждый цикл завершается проявлением сейсмичности с $M \geq 4.3$. Полугодовая цикличность накладывается на низкочастотную и осложняет ее.

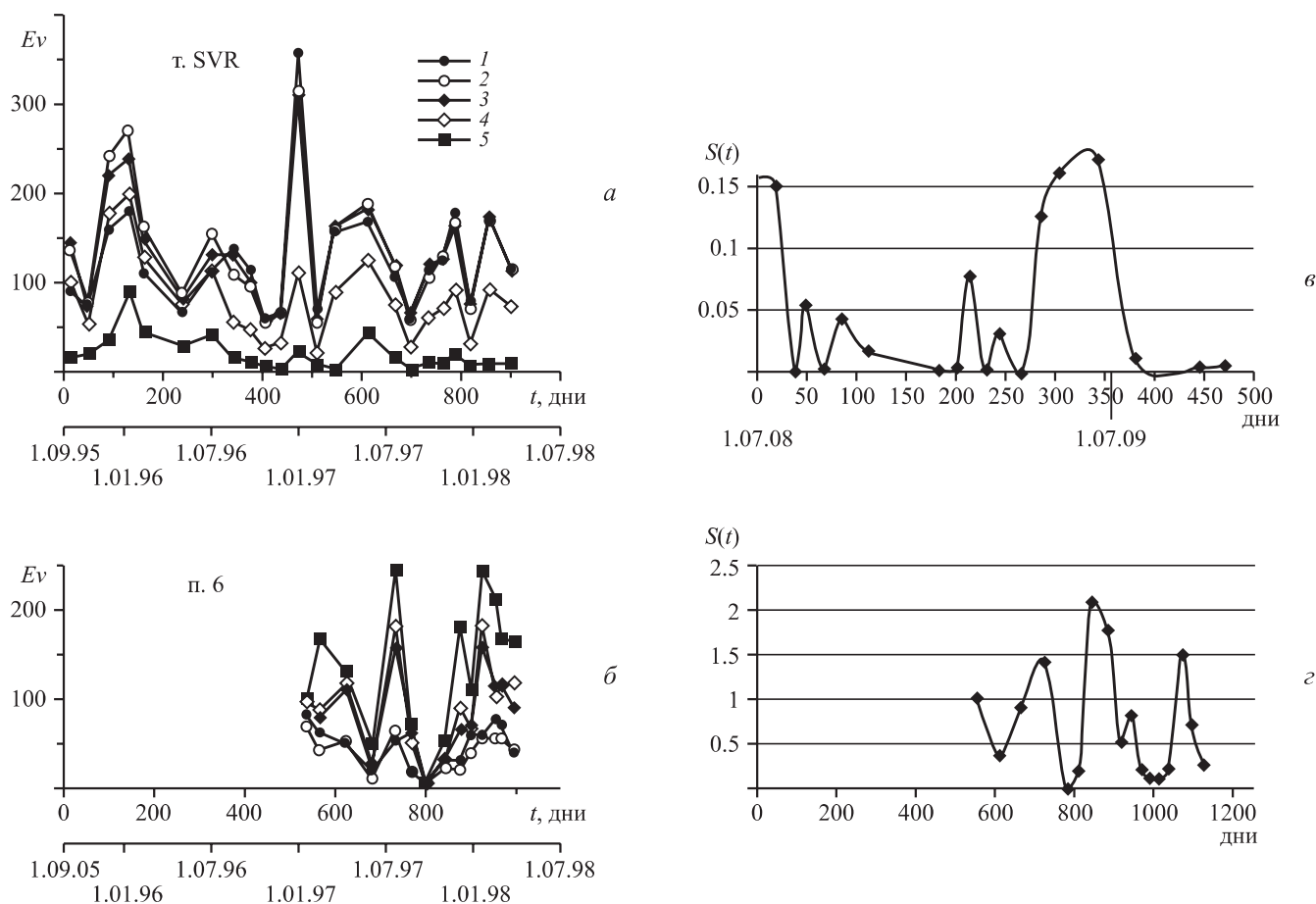


Рис. 2. Цикличность энергетических параметров волн PS и показателей напряженного состояния среды: изменение во времени энергии радиальной компоненты записи E_v обменных волн на одном из пунктов наблюдения при сейсмическом мониторинге Кавминводской (а) и Московской сети (б); изменение во времени показателя напряженного состояния среды S в районе Северской АЭС (Томский регион) (в) и в районе Московской сети (з).

Более короткие временные ряды $S(t)$ для Томского полигона, Московского региона, Белоярского и Нижегородского полигонов не позволили выделить низкочастотную цикличность, связанную с тектонической активностью регионов. Возможно, этой цикличности для слабо сейсмически активных и асейсмичных платформенных регионов не существует. Для зависимости $S(t)$ Томского полигона выявлена годовая цикличность, но эта цикличность скорее всего той же природы, что и полугодовая цикличность Кавминводского и Московского регионов (рис. 2в).

Таким образом, в изменении энергии амплитуд волн PS и показателей напряженного состояния среды во времени $\gamma(t)$ и $S(t)$ как в сейсмоопасных, так и в асейсмичных регионах выявляется высокочастотная цикличность с периодами 180 суток (0.5 года) и 1 год. Низкочастотную цикличность, если она существует, можно выявить только при очень длительных непрерывных наблюдениях.

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ПРОГНОЗА УСИЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В СЕЙСМООПАСНЫХ РЕГИОНАХ

Низкочастотная цикличность, выявленная по зависимости $S(t)$ в сейсмоопасном Кавминводском регионе, позволила говорить о его тектоническом режиме и установить среднесрочные критерии усиления сейсмической активности. Осредненная зависимость $S(t)_{ос}$, характеризующая изменение показателя напряженного состояния среды за длительный период наблюдений, как уже отмечалось, состоит из нескольких циклов, длительность которых составляет 2–3 года. Каждый цикл в свою очередь состоит из трех фаз [8, 11], которые согласуются с тремя фазами подготовки тектонического землетрясения, отмеченными в работе [5]. Фазы возрастания показателя напряженного состояния S указывают на усиление анизотропных свойств изучаемой среды на всей площади исследования,

а в фазах низких значений S степень анизотропности среды мала. Сильные события ($M \geq 4.3$) происходят при максимальных значениях $S(t)_{oc}$ [8, 11].

Закономерное возрастание зависимости $S(t)_{oc}$ после достаточно длительного периода низких значений, по-видимому, можно считать среднесрочным критерием усиления сейсмической активности. Анализируя зависимость $S(t)_{oc}$ в соответствии с идеями, изложенными в работе [5], были сформулированы некоторые критерии среднесрочного прогноза сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 4.3$ в Кавминводском регионе [8, 11]:

- наличие достаточно длительного периода низких значений зависимости $S(t)_{oc}$; чем выше магнитуда готовящегося землетрясения, тем длительнее период низких значений $S(t)_{oc}$;

- устойчивое возрастание функции $S(t)_{oc}$; градиент возрастания и максимальные значения $S(t)_{oc}$ зависят от магнитуды готовящегося землетрясения и его удаленности от сети.

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА ОЦЕНОЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ

Одна из ключевых проблем – раскрытие механизмов взаимодействия разных геофизических полей и проявление их суммарного воздействия на состояние геологической среды (синергетика процесса).

В этом аспекте изучение внешних воздействий с помощью сейсмо-экологического мониторинга в сейсмоопасных районах и районах размещения особо важных объектов крайне важно, поскольку эти воздействия могут явиться триггером в процессе подготовки тектонических или техногенных катастроф. К внешним природным воздействиям на геологическую среду следует отнести ежесуточные приливные воздействия Солнца и Луны, лунные и солнечные затмения, влияние Луны в различных ее фазах, солнечную активность (магнитные бури), изменение скорости вращения Земли, воздействие катастрофических далеких землетрясений.

Для оценки влияния катастрофических далеких землетрясений на геодинамические показатели состояния среды использовалась описанная выше методика, разработанная в ИГЭ РАН и позволяющая оценивать напряженное состояние среды по энергии обменных волн PS от далеких землетрясений [8].

Влияние Луны, Солнца и магнитных бурь на состояние среды в основном оценивалось по микросейсмическим колебаниям, зарегистрированным при сейсмо-экологическом мониторинге. Микросейсмический фон постоянно присутствует на записях мониторинга и доступен для изучения в средах с разной тектонической активностью [19]. Характеристики микросейсмического фона являются показателями напряженного состояния среды [10, 14, 19].

Влияние далеких катастрофических землетрясений

Влияние катастрофических далеких землетрясений рассматривалось в двух аспектах.

I. Влияние далеких катастрофических землетрясений на возрастание показателей анизотропности γ и напряженного состояния S и соответственно на усиление местной сейсмической активности в регионе, удаленном от эпицентра катастрофического землетрясения на расстояние порядка 7000 км.

II. Влияние далекого катастрофического землетрясения на прекращение работы очага местного землетрясения.

Первый аспект. В результате анализа результатов сейсмо-экологического мониторинга в районе сейсмоопасной среды Кавминводского полигона, было установлено, что после далеких катастрофических событий с $M > 7.0$ (например, такого как Суматранское землетрясение 2004 г. с $M = 9.0$, удаленного от сети мониторинга примерно на 7000 км), сопровождаемых интенсивными низкочастотными поверхностными волнами, резко изменились показатели анизотропности γ и напряженного состояния S среды в районе мониторинга. Было зафиксировано усиление местной сейсмической активности с магнитудами $M \geq 4.3$ [8, 9], которую можно считать наведенной [6].

В регионе умеренной сейсмической активности, таком как Белоярский полигон (Средний Урал), также было отмечено формирование области повышенной напряженности по оценкам показателей γ и S , связанной с влиянием катастрофического далекого землетрясения из Японского региона (остров Хонсю 7.12.2012 г., $M = 7.3$). Усиления местной сейсмической активности в районе наблюдения отмечено не было.

Из проведенного анализа был сделан вывод, что далекие катастрофические землетрясения с магнитудами $M > 7.0$, после которых регистрируются интенсивные поверхностные волны, могут резко изменять показатели напряженного со-

стояния среды регионов, удаленных от эпицентра катастрофического землетрясения (удаление до 7000–7500 км) [8, 9]. В результате усиливается сейсмическая активность этих регионов, что позволяет говорить о наведенной сейсмичности [6].

Влияние катастрофических далеких землетрясений на геодинамические показатели геологической среды γ и S в асейсмичных регионах удалось проанализировать только для платформенного района Нижегородской АЭС, где во время проведения мониторинга было зарегистрировано катастрофическое Фукусимское землетрясение 11.03.2011 г. (Япония, $M = 9.0$). Низкочастотные поверхностные волны от этого землетрясения регистрировались в районе Нижегородской АЭС в течение 1 часа. Тем не менее никакого увеличения значений показателя анизотропности γ и показателя напряженности S в среде Нижегородского полигона после регистрации японского землетрясения не наблюдали.

Второй аспект. Воздействие далеких катастрофических землетрясений в сейсмоопасных регионах проявилось и в другом аспекте, а именно, в прекращении работы очага местного землетрясения.

6.02.2006 г. в 150 км к югу от сети станций мониторинга Кавминводского полигона (район Дзиркульского массива) произошло сильное событие – Северо-Кавказское землетрясение, с магнитудой $M = 5.9$. Оно сопровождалось большим количеством афтершоков с магнитудой $M > 4.1$, сформировавшим очаговую область. Афтершоковая деятельность в очаге продолжалась до середины июля 2006 г., при этом область высоких значений γ четко переместилась в южную часть изучаемого района, в сторону максимального воздействия от очаговой области, расположенной в 150 км к югу от сети станций [13].

17.07.2006 г. на острове Ява произошло катастрофическое землетрясение ($M = 7.2$) (удаленность от района Кавминвод 7800 км). Интенсивные поверхностные волны от этого землетрясения регистрировались в районе мониторинга в течение 2 часов. После регистрации землетрясения область повышенных значений γ переместилась в восточную часть полигона – в сторону, откуда подошло землетрясение с о. Ява, при этом афтершоковая активность в очаге сразу же прекратилась.

Таким образом, очевидно, что влияние катастрофических ($M > 7.0$) землетрясений резко изменяет структуру анизотропных свойств сейсмоактивной среды удаленных регионов, в од-

них случаях вызывая повышенную активизацию среды, в других – резко прекращая активизацию очага сильного местного землетрясения. В платформенной асейсмичной среде влияние далеких катастрофических землетрясений может не проявляться, поскольку такие среды, вероятно, имеют другую структуру и большую устойчивость, чем сейсмоопасная среда.

*Влияние космических факторов:
солнечных и лунных затмений, фаз луны,
магнитных бурь*

Наиболее сильное воздействие внешних природных факторов связано с гравитационным приливным воздействием Луны и Солнца, а также с солнечной активностью [1, 3]. Лунное затмение всегда совпадает с полнолунием, а солнечное – с новолунием. Известно, что вспышки на Солнце, магнитные бури влияют на погодные условия нашей планеты, на здоровье людей и, вероятно, на напряженное состояние среды. В числе первых работ по изучению связи солнечной активности с сейсмичностью следует отметить работу А.Д. Сытинского [17].

Влияние Луны, Солнца и магнитных бурь на состояние среды в основном оценивалось по микросейсмическим колебаниям. Результаты оценки влияния внешних природных факторов сопоставлялись для сейсмоопасных и асейсмичных платформенных регионов [12, 14]. Регистрация микросейсмического фона во всех регионах, где проводился сейсмо-экологический мониторинг, осуществлялась по всем регулярно работающим ночью станциям. Это позволяет считать, что влияние техногенного и человеческого фактора очень мало.

Рассчитывались средние значения модулей амплитуд вертикальной $A_z(\text{ср})$ и горизонтальной $A_R(\text{ср})$ компонент записи фона за 30-минутный интервал наблюдения, а также среднее значение амплитуды полного вектора $A_w(\text{ср})$ [14, 15]. По зависимостям $A_z(t)$, $A_R(t)$ и $A_w(t)$ проводился анализ влияния перечисленных выше внешних природных факторов на амплитуды микросейсмического фона. Помимо изменения уровня амплитуд микросейсмического фона, в результате воздействия внешних факторов анализировалось изменение направления вектора смещения фона. Рассчитывался угол φ (в градусах) между направлением горизонтальной составляющей вектора смещения микросейсмического фона $\bar{R}$ и направлением оси Y либо угол α (в градусах) – угол между направлением полного вектора скорости смещения $\bar{W}$ микросейсмического фона и осью Z .

Анализировались зависимости от времени $\varphi(t)$ или $\alpha(t)$.

Для изучения влияния воздействия внешних факторов на спектральный состав фона рассчитывались также спектры тех же записей микросейсмического фона, для которых анализировались амплитуды.

Сейсмоопасные зоны

Влияние солнечных затмений. Рассматривалось влияние полного солнечного затмения 1.08.2008 г. и частного солнечного затмения 15.01.2010 г. в районе Северской АЭС (Томский регион), а также полного солнечного затмения 29.03.2006 г. в районе Кавминвод на амплитудно-частотные характеристики микросейсмического фона. Во всех трех случаях наблюдалось резкое увеличение амплитуд фона (в 3–5 раз) в течение времени, пока длится затмение [12, 15]. Кроме того, отмечено резкое изменение направления вектора смещения микросейсмического фона, что проявляется как отклонение угла φ и α на 30–70° (рис. 3) [14, 15].

Влияние лунных затмений. Записи микросейсмического фона на Томском полигоне позволили проанализировать влияние полутеневого лунного затмения, которое произошло 6.08.2009 г., а также влияние луны в фазах полнолуния и «безлуния» – новолуния [14, 15] («безлуние» – полное отсутствие Луны). При лунном затмении отмечено увеличение амплитуд микросейсмического фона в 5–7 раз, но не кратковременное и резкое, как при солнечном затмении в течение нескольких часов, а постепенное в течение 5–6 суток до лунного затмения [15]. Максимальные амплитуды фона (увеличение более чем в 5 раз) отмечаются за двое суток до лунного затмения.

Под влиянием полнолуния и лунного затмения за 1–2 суток до этих воздействий также отмечено резкое изменение направления вектора смещения микросейсмического фона.

Таким образом, при солнечном и лунном затмениях, а также при полнолунии в сейсмоопасных регионах отмечаются значительные отклонения направления смещения фона. При солнечных затмениях эти отклонения имеют место во время максимальной фазы затмения, а при лунном затмении и при полнолунии эти отклонения отмечаются за сутки или двое до этих природных явлений (см. рис. 3).

Анализ влияния солнечного и лунного затмений, а также Луны в разных ее фазах на спектральный состав микросейсмического фона в сей-

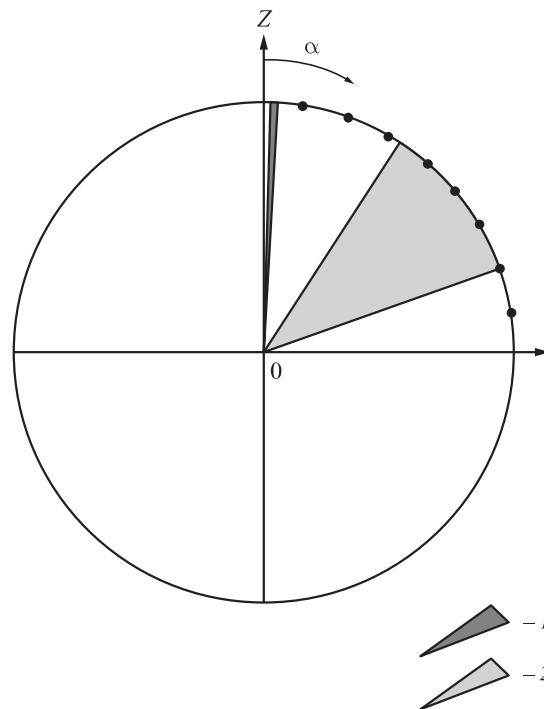


Рис. 3. Угол отклонения вертикальной компоненты направления вектора смещения микросейсмического фона (α) под влиянием внешних природных факторов (лунных и солнечных затмений, полнолуния и т.д.) в разных по своей тектонической активности регионах: 1 – платформенные регионы, 2 – сейсмоопасные регионы.

смоопасных регионах (Кавминводы, районы Северской и Белоярский АЭС) показал, что частота максимума спектра перед солнечным затмением перемещается в сторону более высоких частот, а в момент максимальной фазы затмения спектр фона становится широкополосным (полоса частот 1–7 Гц) [14, 15]. Эффект расширения полосы спектра исчезает уже через несколько часов. Во время «безлуния – новолуния» спектр микросейсмического фона становится узконаправленным, моночастотным.

Влияние солнечной активности. Влияние магнитных бурь на микросейсмический фон в сейсмоактивном регионе удалось проанализировать только для Томского региона [12], где оно проявилось резким возрастанием амплитуд микросейсмического фона, но с некоторым запаздыванием до 3 суток по отношению к началу магнитной бури. Спектральный состав микросейсмического фона становится более широкополосным за сутки до магнитных бурь.

Асейсмичные территории

Влияние солнечного и лунного затмений, а также Луны в фазах полнолуния и новолуния на амплитудно-частотные характеристики микро-

сейсмического фона оценивалось в асейсмичном платформенном регионе Нижегородской АЭС, а также в районе проектируемой Кольской АЭС.

Анализ амплитуд микросейсмического фона показал, что затмения лунное и солнечное и Луна в фазе полнолуния в платформенных асейсмичных регионах очень слабо влияют на уровень микросейсмического фона, увеличение амплитуд фона всего в 1.2 раза (район Нижегородской АЭС), либо совсем не влияют, как в районе щита (Кольская АЭС) [15].

Изменение направления вектора смещения фона за счет лунного и солнечного затмения в платформенных регионах также очень мало, локальные аномалии величины угла α в пределах 1.5° (рис. 3) либо полностью отсутствуют [15].

За счет влияния солнечных и лунных затмений спектр записи микросейсмического фона становится более узкополосным, полоса основных частот спектра сужается в 2 раза, максимум спектра смещается в область более низких частот (Нижегородский регион), либо остается неизменным (Кольский регион).

Таким образом, внешние природные факторы оказывают существенное влияние на геологическую среду:

– катастрофические землетрясения ($M > 7.0$) резко изменяют структуру анизотропных свойств сейсмоактивной среды удаленных регионов, в одних случаях вызывая повышенную активизацию среды, в других резко прекращая активизацию очага сильного местного землетрясения; в платформенной асейсмичной среде влияние далеких катастрофических землетрясений может не проявляться.

– в сейсмоактивной среде установлено влияние солнечного и лунного затмений, которые проявляются резким увеличением (в 3–7 раз) амплитуд микросейсмического фона, отклонением направления вектора смещения фона и существенным расширением полосы его частотного состава. Отмечено также влияние Луны в фазе «безлуния» – новолуния на направление вектора смещения фона и особенно на его частотный состав (спектр становится моночастотным). Магнитные бури проявляются увеличением в 3–7 раз амплитуд микросейсмического фона, но с запаздыванием по отношению к началу магнитной бури, при этом отмечается расширение спектрального состава за сутки до начала магнитных бурь.

– для платформенных асейсмичных регионов результаты влияния внешних природных факто-

ров на амплитудно-частотные характеристики микросейсмического фона незначительны.

ВЫВОДЫ

На основании анализа результатов сейсмо-экологического мониторинга в регионах разной тектонической активности можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика оценки напряженного состояния среды.
2. Сделаны выводы, что геодинамические показатели напряженного состояния изменяются во времени в средах разной тектонической активности, однако уровень и контрастность изменений оценочных геодинамических показателей существенно отличаются в 10–100 раз в сейсмоопасных и асейсмичных регионах.
3. Выявлена цикличность изменения показателей напряженного состояния среды с периодом 0.5 года и 1 год, связанная с изменением скорости вращения Земли, либо с климатическим фактором для регионов любой тектонической активности. Для сейсмоопасных областей выявлена также цикличность, связанная с циклом тектонической активности данного региона.
4. Разработаны критерии прогноза усиления сейсмической активности в сейсмоопасных регионах.
5. Выявлено влияние внешних природных факторов на изменение геодинамических показателей напряженного состояния среды, на усиление сейсмической активности, а также на амплитудно-частотные характеристики микросейсмического фона, особенно в сейсмоопасных регионах.

Все особенности изменения показателей напряженного состояния среды и амплитудно-частотных параметров микросейсмического фона в разных районах проведения локального сейсмо-экологического мониторинга 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас временных вариаций природных процессов. Порядок и хаос в литосфере и других сферах. Т. 1. М.: ОИФЗ РАН, 1994. 176 с.
2. Барсуков О.М. Годичные вариации сейсмичности и скорости вращения Земли // Физика Земли. 1994. № 4. С. 96–98.
3. Бобряков А.П., Ревузенко А.Ф., Шемякин Е.И. Приливное деформирование планет: опыт экспериментального моделирования // Геотектоника. 1991. № 6. С. 21–35.
4. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 4. С. 804–815.
5. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
6. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. 222 с.
7. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земли. М.: Недра, 1997. 256 с.
8. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф. Результаты долговременного сейсмического мониторинга в сейсмоопасном районе Кавказских Минеральных Вод // Геоэкология. 2008. № 2. С. 35–40.
9. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Недядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние удаленных территорий // Сб. трудов геофизических чтений им. В.В. Федынского «Геофизика XXI столетия: 2006 г.». М.: Изд-во Мир, 2007. С. 200–204.
10. Попова О.Г., Серый А.В., Щеглаков В.В. Микросейсмический фон – показатель экологического состояния региона исследования // Сб. матер. VI междунар. науч. конф. «Мониторинг опасных геологических процессов и экологического состояния среды», Киев, 5–7 октября 2005, Киев: Изд-во Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, 2005. С. 119–121.
11. Попова О.Г., Жигалин А.Д., Коновалов Ю.Ф. Изучение геодинамики среды во времени на разных уровнях глубин, среднесрочные критерии прогноза землетрясений // Сб. трудов седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского «Геофизика XXI столетия: 2005 г.». М.: Мир, 2006. С. 237–240.
12. Попова О.Г., Жигалин А.Д., Коновалов Ю.Ф. Связь напряженного состояния Земной коры с солнечными затмениями и магнитными бурями // Геоэкология. 2011. № 2. С. 157–164.
13. Попова О.Г., Жигалин А.Д. Влияния катастрофических событий ($M > 6.8–7.0$) на сейсмическую активность в удаленных от эпицентра сейсмоопасных регионах // Сб. матер. XVII Всерос. конф. с междунар. участием «Проблемы сейсмогеотектоники», Москва – Воронеж 20–24 сентября 2011 года. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. С. 432–436.
14. Попова О.Г., Жигалин А.Д., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Реакция микросейсмического фона на внешние природные воздействия в районах с разной тектонической активностью // Геоэкология. 2014. № 2. С. 155–168.
15. Попова О.Г., Жигалин А.Д., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В., Лаврик Е.В. Геодинамический мониторинг при проектировании объектов энергетики // Геоэкология. 2015. № 5. С. 460–468.
16. Рулев Б.Г. Годовая периодичность в эмиссии микроземлетрясений и неравномерность вращения Земли // Землетрясения и процессы их подготовки. М.: Наука, 1991. С. 127–138.
17. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–30.
18. Шабаров А.П., Тарасов Б.Г. Геодинамическое состояние массива горных пород в циклах Земли и Солнца // Тез. докл. «Пятые геофизические чтения имени В.В. Федынского». М.: Центр Геон им. В.В. Федынского, 2003. С. 51–52.
19. Юдахин Ф.Н. Микросейсмические колебания – важнейший источник информации // Вестник Уральского отделения РАН. 2010. № 3(33) С. 65–73.
20. 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.
21. Crampin S. A Review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media // Wave motion. 1981. № 3. P. 343–391.

REFERENCES

1. Atlas vremennykh variatsii prirodnikh protsessov. Poryadok i khaos v litosfere i drugikh sferakh. [Atlas of time variations in natural processes. Order and chaos in the lithosphere and the other spheres]. Vol. 1. Moscow, OIFZ RAN Publ., 1994. 176 p. (in Russian).
2. Barsukov, O.M. Godichnye variatsii seismichnosti i skorosti vrashcheniya Zemli [Annual variations of seismicity and the Earth rotation speed]. Fizika Zemli, 1994, no. 4, pp. 96–98 (in Russian).
3. Bobryakov, A.P., Revuzhenko, A.F., Shemyakin, E.I. Prilivnoe deformirovanie planet: opyt eksperimental'nogo modelirovaniya [Tidal deformation of planets: experience in experimental modeling]. Geotektonika, 1991, no. 6, pp. 21–35 (in Russian).
4. Geek, L.D. Fizicheskoe modelirovanie rasprostraneniya seismicheskikh voln v poristyykh i treshchinovatykh sredakh [Physical modeling of distribution of seismic waves in porous and fractured environments]. Geologiya i geofizika, 1997, vol. 38, no. 4, pp. 804–815 (in Russian).

5. Myachkin, V.I. *Protsessy podgotovki zemletryasenii* [Processes of earthquakes' preparation]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 232 p. (in Russian).
6. Nikolaev, A.V. *Problemy navedennoi seismichnosti. Naverdennaya seismichnost'*. [Problems of induced seismicity. The induced seismicity]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 222 p. (in Russian).
7. Pomerantseva, I.V., Mozzhenko, A.N. *Seismicheskie issledovaniya s apparaturoi Zemlya* [Seismic researches with the Earth equipment]. Moscow, Nedra, 1997, 256 p. (in Russian).
8. Popova, O.G., Seryi, A.V., Konovalov, Yu.F. *Rezultaty dolgo vremennogo seismicheskogo monitoringa v seismoopasnom raione Kavkazskikh Mineral'nykh Vod* [Results of long-term seismic monitoring in the seismic region of Caucasian Mineral'nye Vody]. *Geoekologiya*, 2008, no. 2, pp. 35–40 (in Russian).
9. Popova, O.G., Seryi, A.V., Konovalov, Yu.F., Nedyad'ko, V.V. [Influence of catastrophic earthquakes on the stress state of remote areas]. *Sb. trudov geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo «Geofizika XXI stoletiya: 2006 g.»* [Proceedings of Fedynskii geophysical workshop «Geophysics in the XXI century: 2006»]. Moscow, Mir Publ., 2007, pp. 200–204 (in Russian).
10. Popova, O.G., Seryi, A.V., Shcheglakov, V.V. [The microseismic background as the indicator of the ecological condition in the studied region]. *Sb. Mater. VI mezhdunar. nauch. konf. «Monitoring opasnykh geologicheskikh protsessov i ekologicheskogo sostoyaniya sredy»* [Proc. VI Intern. Sci. Conference «Monitoring of dangerous geological processes and ecological condition of the environment», Kiev, October 5–7, 2005]. Kiev, izd-vo Kievskogo nats. un-ta im. T. Shevchenko, 2005, pp. 119–121 (in Russian).
11. Popova, O.G., Zhigalin, A.D., Konovalov, Yu.F. [Study of the environment geodynamics in time at different depths; medium-term criteria of the earthquakes' forecast]. *Sb. trudov geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo «Geofizika XXI stoletiya: 2006 g.»* [Proceedings of Fedynskii geophysical workshop «Geophysics in the XXI century: 2006»]. Moscow, Mir Publ., 2007, pp. 237–240 (in Russian).
12. Popova, O.G., Zhigalin, A.D., Konovalov, Yu.F. *Svyaz' napryazhennogo sostoyaniya zemnoi kory s solnechnymi zatmeniyami i magnitnymi buryami* [Connection of the Earth crust's tension to solar eclipses and magnetic storms]. *Geoekologiya*, 2011, no. 2, pp. 157–164 (in Russian).
13. Popova, O.G., Zhigalin, A.D. [Influences of catastrophic events ($M \geq 6.8-7.0$) on seismic activity in seismic regions remote from the epicenter]. *Sb. mater. XVII vseross. konf. s mezhdunar. uchastiem «Problemy seismotektoniki»* [Proceedings of the XVII All-Russia Conf. with international participation «Problems in seismotectonics», Moscow – Voronezh, September 20–24, 2011], Voronezh, Voronezh. gos. univ. Publ., 2011, pp. 432–436 (in Russian).
14. Popova, O.G., Zhigalin, A.D., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyad'ko, V.V. *Reaktsiya mikro seismicheskogo fona na vneshnie prirodnye vozdeystviya v raionakh s raznoi tektonicheskoi aktivnost'yu* [Reaction of microseismic background on external natural impacts in the areas with different tectonic activity]. *Geoekologiya*, 2014, no. 2, pp. 155–168 (in Russian).
15. Popova, O.G., Zhigalin, A.D., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyad'ko, V.V., Lavrik, E.V. *Geodinamicheskii monitoring pri proektirovanii ob'ektov energetiki* [Geodynamic monitoring for designing power engineering objects]. *Geoekologiya*, 2015, no. 5, pp. 460–468 (in Russian).
16. Rulev, B.G. [Annual frequency in microearthquake emission and unevenness in the Earth rotation]. *Zemletryaseniya i protsessy ikh podgotovki* [Earthquakes and processes of their preparation]. Moscow, Nauka, 1991, pp. 127–138 (in Russian).
17. Sytinskii, A.D. *O svyazi zemletryasenii s solnechnoi aktivnost'yu* [About connection of earthquakes with solar activity]. *Fizika Zemli*, 1989, no. 2, pp. 13–30 (in Russian).
18. Shabarov, A.P., Tarasov, B.G. [Geodynamic condition of the rock massif in the Earth and Sun cycles]. *Tezisy dokladov «Pyatye geofizicheskie chteniya imeni V.V. Fedynskogo* [Proceedings of the fifth Fedynskii geophysical workshop]. Moscow, Fedynskii center Geon, 2003, pp. 51–52 (in Russian).
19. Yudakhin, F.N. *Mikroseismicheskie kolebaniya – vazhneishii istochnik informatsii* [Microseismic fluctuations as the most important information source]. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya RAN*, 2010, no. 3 (33), pp. 65–73 (in Russian).
20. 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.
21. Crampin, S. A Review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media. *Wave motion*, 1981, no. 3, pp. 343–391.

THE MAIN RESULTS IN LOCAL SEISMIC ECOLOGICAL MONITORING IN DIFFERENT REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION

O.G. Popova*, M.G. Popov, F.O. Arakelyan***,
V.V. Nedyad'ko***, S.D. Vasyutinskaya***

**Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, Russia. E-mail: oksana-p@list.ru*

***Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991
Russia. E-mail: mgpopov@list.ru*

****Atomseismoizyskaniya Ltd., ul. Skakovaya 32, bld.2, Moscow, 125040 Russia.
E-mail: asi_47@mail.ru*

The paper presents generalized results of seismic-ecological monitoring from natural sources in the Russian Federation regions of different tectonic activity. The method is developed for estimating the stressed state of medium according to the energy characteristics of converted PS waves from distant earthquakes. The values of geodynamic indicators are assessed for the media of different tectonic activity, the main regularities of changes in the geodynamic environment are found, and the cyclicity of geodynamic indicators is revealed on the basis of long-term continuous monitoring. The microseismic background parameters show the influence of external natural factors (the Moon, the Sun, solar activity, etc.) on the geological environment, which differs significantly for seismically active and aseismic regions of the platform.

Keywords: *seismic ecological monitoring, converted PS waves from distant earthquakes, stress state of medium, microseismic background.*