

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 55:504.75:550.348

ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИКИ ПЛАТФОРМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЕЙСМО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2018 г. О. Г. Попова^{1,*}, В. М. Макеев¹, М. Г. Попов^{2,**}, Ф. О. Аракелян^{3,***}, В. В. Недядько³

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр.2, Москва, 101000 Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет,
Ленинские Горы, МГУ, Москва, 119991 Россия

³ООО “Атомсейсмоизыскания”, ул. Скаковая 32, к. 2, Москва, 125040 Россия

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

**E-mail: mgpopov@list.ru

***E-mail: asi_47@mail.ru

Поступила в редакцию 19.02.2018 г.

Для обеспечения сейсмической и экологической безопасности территорий размещения особо опасных объектов выявлены и оценены геодинамические показатели анизотропности γ и напряженного состояния S , повышенные значения которых связываются с появлением локальных сейсмоопасных зон. Оценка этих показателей основывается на результатах сейсмо-экологического мониторинга, организованного в пределах полигонов для выбора наиболее безопасных площадок под строительство атомных станций. Фактический материал, полученный в ходе мониторинга, анализировался согласно методике изучения геодинамики среды по энергетическим характеристикам волн PS от далеких землетрясений, разработанной в ИГЭ РАН. Сравнительный анализ геодинамических показателей районов трех атомных станций, расположенных в разных регионах Восточно-Европейской платформы (ВЕП), показал, что геодинамические показатели могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от воздействия на геологическую среду далеких катастрофических землетрясений и неотектонической (естественной) активности региона. Степень неотектонической активности зависит от удаленности рассматриваемого района от источников тектонических сил и напряжений: горно-складчатых областей (орогенов) и внутриплатформенных геодинамических очагов. Специфическое геологическое и глубинное строение земной коры, представленное авлакогенами и разломными зонами, расслоенностью и ее вертикальной делимостью, также создает дополнительные условия для увеличения геодинамических показателей и, соответственно, появления областей повышенной сейсмической опасности в районе исследования.

Ключевые слова: геодинамика, показатели анизотропности и напряженности, сейсмичность, сейсмо-экологический мониторинг

DOI: 10.1134/S0869780318040075

ВВЕДЕНИЕ

Науки о Земле располагают широким спектром методов изучения современных геодинамических процессов, происходящих в земной коре и в ее приповерхностной зоне, и нацелены на определение взаимосвязи разнотипных процессов и движущих сил, ими управляющих. В настоящее время проводится много исследований, посвященных связям сейсмических процессов с различными геофизическими параметрами: скоростью вращения Земли [3], амплитудой земных приливов [21], геомагнитной активностью [20] и инверсией магнитного поля [12].

При оценке сейсмической и экологической опасности напряженно-деформированное состо-

яние геологической среды – важнейшая геодинамическая характеристика районов гидроэлектростанций (ГЭС) и атомных электростанций (АЭС), предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), химической промышленности, стратегически важных объектов и густонаселенных мегаполисов. К жизненно важным задачам относится также обеспечение безопасного недропользования территорий эксплуатируемых нефтегазовых месторождений, угольных бассейнов, трасс магистральных трубопроводов и др. От оценки тектонических полей напряжений и факторов, определяющих энергетику возможных сейсмических событий, зависит правильность выбора места проектирования и строительства особо опасных объектов в аспекте обеспечения их безопасности.

Перечисленные задачи в большой степени решаются на основе геофизического мониторинга и, в частности, методом локального сейсмо-экологического мониторинга геологической среды [16–18]. С его помощью оцениваются геофизические параметры в пространственно-временном аспекте, и определяются зоны потенциальной геодинамической опасности (зоны риска). В последние годы мониторинг проводится на геодинамических полигонах в пределах особо опасных объектов: ГЭС, АЭС, крупных химически предприятий, шахт, рудников и т.д. В густонаселенных урбанизированных районах проведение мониторинга с искусственными источниками сопряжено с организационными трудностями, и поэтому используются волны от естественных источников.

В течение последних пятнадцати лет в ИГЭ РАН для изучения геодинамики геологической среды развивается метод локального сейсмо-экологического мониторинга от естественных источников. Для этого используются записи далеких землетрясений и микросейсмический фон. Материалы сейсмо-экологического мониторинга (СЭМ) обрабатывались для разных районов: сейсмоактивных, урбанизированных (мегаполисы) и районов особо опасных объектов (АЭС и др.) [16–18]. Длительность мониторинга колебалась от 2–3 месяцев до 11 лет в зависимости от финансирования и решаемых задач.

Согласно целям и задачам, в статье кратко изложен способ оценки напряженного состояния геологической среды, рассматриваются геологические и глубинные условия районов размещения атомных станций, приводятся результаты сейсмо-экологического мониторинга.

СПОСОБ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Способ оценки напряженного состояния геологической среды разработан на основе исследований энергии обменных проходящих волн PS от далеких землетрясений, оцененных в результате длительного локального сейсмического мониторинга в районе Кавказских Минеральных Вод (1995–2006 гг.) [15]. Методика основана на том, что энергия поперечных и обменных волн PS (обменные волны также относятся к поперечным) существенно зависит от степени трещиноватости, пористости, флюидизации и анизотропности массива горных пород [6]. Эти, по сути, аномальные свойства массивов создаются согласно тектонической расчлененности и вертикальной делимости земной коры. При этом современное напряженное состояние зависит от анизотропных свойства среды и ее флюидонасыщенности [23]. Степень напряженности обусловлена близостью или удаленностью от источников тектонических

напряжений: горно-складчатых областей (орогенов), внутриплатформенных глубинных очагов.

Согласно разработанной методике¹, в каждой точке наблюдения (сейсмостанция) геодинамического полигона оцениваются два показателя.

Показатель анизотропности среды (безразмерная величина):

$$\gamma = E_R/E_V,$$

где E_V и E_R – энергия радиальной (PSv) и тангенциальной (PSr) составляющих записи обменных волн от далеких землетрясений соответственно. Показатель анизотропности γ в отличие от коэффициента анизотропии χ [22] позволяет констатировать только наличие в среде анизотропии в большей или в меньшей степени.

При подготовке сильного землетрясения среда находится в напряженном состоянии на довольно большой территории, причем, чем выше магнитуда готовящегося землетрясения, тем на большей площади могут проявляться аномальные свойства среды и тем большую напряженность в среде можно предположить [7]. Согласно этим представлениям строятся схемы пространственного распределения показателя γ для разных интервалов времени.

Интегральный показатель напряженного состояния среды (безразмерная величина) оценивается расчетным путем по распределению параметра γ по площади наблюдательной сети мониторинга [15]:

$$S = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{\delta}^{\infty} \gamma(x, y) dx dy d\gamma / \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \delta xy dx dy,$$

где x, y – координаты района мониторинга; δ – пороговый уровень, превышение которого ($\gamma > \delta$) указывает на возрастание анизотропных свойств и напряженного состояния среды в районе исследования (для каждого региона свой).

Методика оценки напряженного состояния позволяет определять геодинамические показатели γ и S для разных диапазонов глубин земной коры в различные интервалы времени наблюдения и строить 3-х мерные модели распределения показателя γ по площади геодинамического полигона. Длительность интервалов наблюдения колеблется от 12 до 40 суток (в среднем 1 месяц) в зависимости от качества записи проходящих обменных волн PS от зарегистрированных далеких землетрясений.

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>

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЛУБИННЫЕ УСЛОВИЯ В РАЙОНАХ МОНИТОРИНГА

Рассмотрено геологическое и глубинное строение трех районов размещения планируемых атомных станций в пределах ВЕП: Нижегородской АЭС, Кольской АЭС-2 и Тверской АЭС-2.

Нижегородская АЭС находится в 30 км в северо-восточном направлении от г. Муром Владимирской обл. и в настоящее время законсервирована по причине сложных суффозионно-карстовых условий. Район АЭС расположен в широкой полосе сопряжения устойчиво растущего Токмовского свода и Московской синеклизы ВЕП. Поверхность кристаллического фундамента очень полого без резких градиентов погружается здесь с юго-востока в северо-западном направлении с глубин 1.13 до 1.46 км. Осадочный чехол полого залегает на поверхности кристаллического фундамента и лишь в 50–60 км западнее АЭС дислоцирован в виде Окско-Клязьменского вала. Разломы в фундаменте и осадочном чехле не установлены.

Район Нижегородской АЭС максимально удален от геодинамически активных областей и всецело принадлежит удаленной периферии Прикаспийской геодинамической системы [10].

По данным метода обменных волн землетрясений (МОВЗ) глубинные слои земной коры здесь залегают очень полого и тектонически не нарушены [13]. В земной коре примерно до глубины 20 км установлена моноклиналь, которая спокойно без резких градиентов углубляется в северо-западном направлении, согласуясь с наклоном кристаллического фундамента [17]. Здесь выделено пять сейсмических слоев с диапазоном глубин (км): 0–1.45; 1.45–7.0; 7–13.5; 13.5–18 и 18–31. Согласно сейсмическим каталогам, район Нижегородской АЭС относится к сейсмически слабоактивной территории.

Однако в пределах района отмечены суффозионно-карстовые воронки и др. опасные экзогенные явления. Поэтому, несмотря на то, что этот район не относят к сейсмоопасным, выявление областей повышенной анизотропности γ и напряженного состояния S крайне актуально.

Кольская АЭС-2 расположена приблизительно в 45 км в юго-западном направлении от г. Апатиты и удалена в этом же направлении на 7 км от действующей Кольской АЭС-1. Район Кольской АЭС-2 приурочен к Беломорскому раннедевонскому геоблоку – одному из крупных выступов Балтийского щита ВЕП. На кристаллическом фундаменте залегают исключительно четвертичные отложения (кора выветривания и ледниковые отложения). Эти отложения облекают обширное новейшее поднятие сводового типа – Скандинавскую геодинамически активную область повышенной сейсмичности, которая рас-

сматривается в качестве источника тектонических напряжений и деформаций [10]. Согласно сейсмическим каталогам, в районах Балтийского щита возможны землетрясения с магнитудой $M = 5-6$ [1].

На основании глубинных профилей ГСЗ-МОВЗ [2], земная кора этого района разделяется на несколько глубинных слоев. До глубины 1.0 км развиты гнейсы со скоростями распространения волн 5.9 км/с. Верхний слой со скоростями распространения волн 6.2–6.4 км/с развит до глубины 10 км. Глубины от 10 до 25 км отвечают среднему (промежуточному) слою со скоростями распространения волн 6.5–6.7 км/с, который интенсивно расчленен разломами на геоблоки. Интервал глубин 30–40 км относится к нижнему слою, характеризующемуся скоростями волн 6.9–7.0 км/с. По сравнению со средним слоем земной коры, нижний слой менее интенсивно расчленен разломами.

В 2013–2015 гг. в районе Кольской АЭС-2 сейсмическими станциями геодинамического полигона не было зарегистрировано ни одного местного землетрясения. В 2016 г. было зафиксировано два местных землетрясения, причина возникновения которых оставалась неясной.

Тверская АЭС-2 расположена в одноименной области у г. Удомля на берегу оз. Песьво. В 5 км на северо-восток от нее находится действующая Калининская АЭС. Район с расположенной в центре площадкой АЭС-2 находится в пределах Крестовско-Валдайского рифейского авлакогена, глубоко погребенного под осадочными отложениями Московской синеклизы. Согласно неотектоническим исследованиям, район Тверской АЭС относится к геодинамически пассивной периферии Скандинавской активной области. Согласно сейсмическим каталогам, рассматриваемый район – это сейсмически слабоактивная территория, в пределах которой возможны землетрясения с магнитудой не более 2–3 [1]. За время работы сейсмических станций на геодинамическом полигоне Тверской АЭС-2 не было зарегистрировано ни одного местного землетрясения.

В рассматриваемом районе кристаллический фундамент представлен сильно дислоцированными метаморфическими и изверженными породами архей-раннепротерозойского возраста. По причине наличия авлакогена поверхность фундамента залегает на глубине от 1.5 до 3.5 км и расчленена на структурные геоблоки разного порядка. Блокоразделы, так называемые “потенциально мобильные зоны”, представлены древними разломами различного простирания и амплитуд смещений [4, 5, 8]. Активные разломы здесь не установлены, но древние разломы, рассматриваемые как вещественно-структурные неоднородности, способны перераспределять современные

напряжения и создавать условия для появления аномально высоких напряжений и их разрядки.

Осадочные отложения чехла кристаллического фундамента представлены полого залегающими верхнепротерозойскими (рифейскими), палеозойскими и кайнозойскими отложениями общей мощностью 3.5 км. К северу от авлакогена распространена Балтийская моноклираль, к югу — Нелидово-Торжокский свод; в их пределах мощность осадочного чехла быстро уменьшается соответственно до 1.0 км (Бабаево) и до 1.5 км (Вышний Волочек).

На основании скоростных разрезов профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ “РИФЕЙ IIIa и IIIб”) [8], земная кора разделена на четыре глубинных диапазона:

— слой 0–2.5 км — отвечает осадочному чехлу со скоростью прохождения продольной волны 2.5 км/с;

— слой 2.5–10 км — консолидированная верхняя часть коры со скоростью волны 5.5 км/с;

— слой 10–22 км — соответствует средней части коры со скоростью волны 6.33 км/с;

— слой 22–32.5 км — отнесен к нижней части коры со скоростью 6.64 км/с.

Геодинамические показатели S и γ были оценены для всех указанных диапазонов глубин земной коры, что позволило построить 3-х мерные пространственно-временные модели их изменения.

Таким образом, районы Нижегородской, Кольской и Тверской АЭС характеризуются специфическими геологическими и глубинными условиями, которые могут влиять на величину и распределение геодинамических показателей γ и S во времени и пространстве. В районе Кольской АЭС сейсмическая активность довольно высокая, тогда как в двух других рассматриваемых районах расположения атомных станций она минимальна.

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Фактический материал сейсмо-экологического мониторинга (СЭМ) обрабатывался согласно методике изучения геодинамики геологической среды по энергетическим характеристикам обменных волн PS от далеких землетрясений [15]. Цель анализа — выявить и оценить геодинамические показатели γ и S во времени и по глубине, диапазон изменения этих показателей и области их аномальных значений. Важно определить природу этих аномалий, поскольку значения геодинамических показателей (γ и S) могут изменяться под влиянием разных факторов: неотектонических (естественных) полей напряжений и дефор-

маций и далеких катастрофических землетрясений [14, 15].

СЭМ был проведен на трех геодинамических полигонах: Нижегородском, Кольском и Тверском, развернутых в ближних районах одноименных атомных электростанций. Площадь полигонов составляет 40×50 – 40×60 км². Исследования проводились с помощью 3-х компонентных цифровых сейсмических станций типа “Дельта-Геон” (количество сейсмостанций — 5–6).

На *Нижегородском полигоне* СЭМ проводился в течение почти 11 месяцев 2011 г. Оценка геодинамических показателей (γ и S) проведена на основе записей далеких землетрясений. С целью корректной и детальной оценки влияния навесных процессов на напряженное состояние слабосейсмичной среды записи были распределены по пяти интервалам времени и согласно сейсмическим диапазонам глубин (табл. 1) [9, 11, 14, 15].

Во время мониторинга произошли два катастрофических землетрясения: 1) катастрофическое землетрясение в Японии (Фукусимское) 11.03.2011 г. с магнитудой $M = 9.0$, которое сопровождалось цунами, и 2) разрушительное землетрясение в Турции 21.10.2011 г. с магнитудой $M = 7.1$. На Нижегородском полигоне от этих катастрофических землетрясений были зарегистрированы интенсивные низкочастотные поверхностные волны. Эти волны регистрируются после прихода продольной волны P и обменных волн и являются опасным фактором, способным вызвать местную сейсмическую активность. Подобное явление отмечалось в сейсмоактивном регионе Кавказских Минеральных Вод [14, 15], в котором из-за влияния далеких катастрофических землетрясений значительно увеличилась анизотропность и напряженного состояния среды, что привело к усилению местной локальной сейсмичности.

Для всех интервалов времени и диапазонов (см. табл. 1) глубин были рассчитаны показатели анизотропности γ и напряженного состояния S , соответствующие пунктам наблюдений [17]. Для каждого слоя построены схемы распределения геодинамического показателя γ , согласно сети наблюдений полигона, и оценено значение показателя S (рис. 1). Из представленных данных видно, что во всех интервалах наблюдения и интервалах глубин значения показателя анизотропности $\gamma = E_R/E_V$ не превышали 0.78, а значения показателя напряженного состояния $S \leq 0.107$. Однако отмечены локальные участки аномальных значений показателя γ , причем их положение по глубине меняется (см. рис. 1). Так в 1-м интервале наблюдения область повышенной анизотропности и, соответственно, напряженности расположена в слоях от 13.5 до 31 км. Наибольший интервал глубин (1.45–31 км) слабых аномалий анизотроп-

Таблица 1. Геодинамические показатели состояния геологической среды Нижегородского полигона

Год проведения СЭМ	Номер интервала наблюдений	Временные границы интервалов наблюдения	Диапазон глубин слоев (км)	Показатель анизотропности (γ)	Интегральный показатель напряженного состояния (S)
2011 г.	1	15.01.11–10.03.11	0–1.45	0–0.48	0.017
			1.45–7.0	0–0.34	0
			7.0–13.5	0–0.25	0
			13.5–18.0	0–0.64	0.107
			18.0–31.0	0.0–0.66	0.081
	2	11.03.11–05.04.11	0–1.45	0–0.25	0
			1.45–7.0	0–0.22	0.00037
			7.0–13.5	0–0.45	0
			13.5–18.0	0–0.36	0.0033
			18.0–31.0	0.34	0
	3	10.06.11–31.07.11	0–1.45	0–0.073	0
			1.45–7.0	0–0.27	0
			7.0–13.5	0–0.67	0.0192
			13.5–18.0	0–0.58	0.006
			18.0–31.0	0–0.46	0.00034
	4	01.09.11–21.10.11	0–1.45	0–0.42	0
			1.45–7.0	0–0.7	0.027
			7.0–13.5	0–0.78	0.044
			13.5–18.0	0–0.59	0.01
			18.0–31.0	0–0.5	0.004
5	21.10.11–10.11.11	0–1.45	0–0.1	0	
		1.45–7.0	0–0.3	0.001	
		7.0–13.5	0–0.64	0.012	
		13.5–18.0	0–0.5	0.002	
		18.0–31.0	0–0.44	0.0013	

ности и повышенной напряженности среды соответствует 4-му интервалу наблюдений. Следовательно, можно констатировать факт, что анизотропные свойства среды изменяются во времени и в пространстве, локальные аномалии показателя γ мигрируют по разрезу. Однако, в диапазоне глубин, соответствующих толще над поверхностью фундамента (0–1.45 км), за все время наблюдения аномалий показателя γ отмечено не было.

Появление и миграция областей повышенных геодинамических показателей по разрезу земной коры можно связать с нахождением рассматриваемого района в специфических условиях, кото-

рые определяются склоном Токмовского поднятия, на который воздействуют напряжения со стороны Окско-Донского глубинного источника тектонических сил. С этими напряжениями в приповерхностных слоях геологической среды в районе Нижегородской АЭС связывают формирование открытой проницаемой трещиноватости, которая и является одним из условий активности суффозионно-карстовых процессов [10].

В работах [14, 15] было показано, что в сейсмоопасном регионе возможно усиление анизотропности и напряженного состояния среды за счет влияния далекого катастрофического землетря-

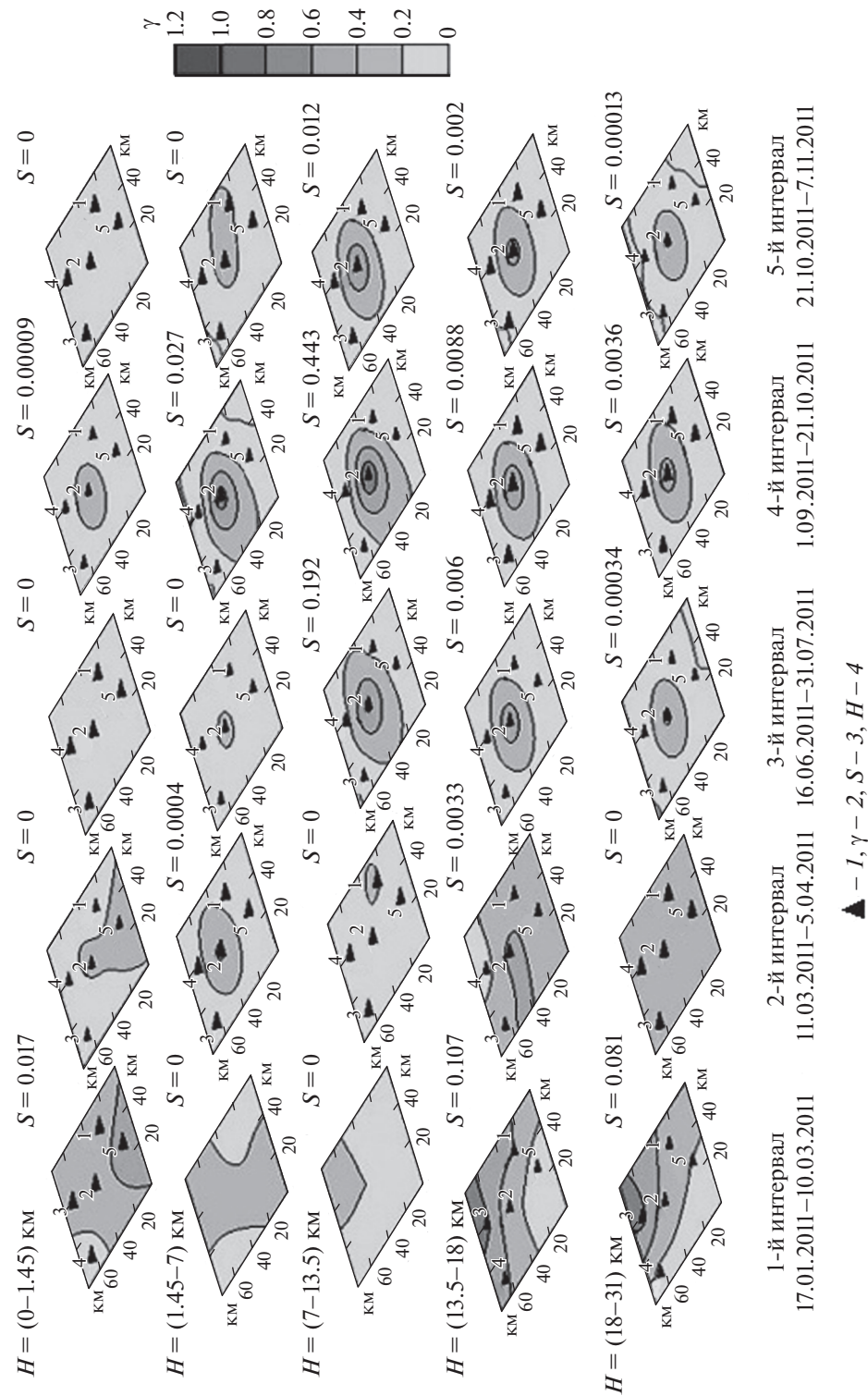


Рис. 1. Трехмерные модели распределения по площади наблюдения сети мониторинга Нижегородской АЭС показателя анизотропности γ на разных глубинах в разные интервалы времени наблюдения: 1 – пункты наблюдения, 2 – показатель анизотропности γ , 3 – показатель напряженного состояния S, 4 – интервал глубин H.

сения. При этом активизируется местная сейсмичность, что связано с воздействием интенсивных низкочастотных поверхностных волн.

После Фукусимского катастрофического землетрясения, произошедшего 11.03.2011 г. с магнитудой $M = 9.0$, на Нижегородском полигоне по-

Таблица 2. Геодинамические показатели состояния геологической среды Кольского полигона

Год проведения СЭМ	Номер интервала наблюдений	Временные границы интервалов наблюдения	Диапазон глубин слоев (км)	Показатель анизотропности среды (γ)	Интегральный показатель напряженного состояния среды (S)
2013–2014 гг.	1	16.08.13–12.10.13	0–10	0–0.2	0.0
			10–25	0–0.4	0.029
	2	15.10.13–25.01.14	0–10	0–0.6	0.086
			10–25	0–0.6	0.219
2015–2016 гг.	3	26.10.15–11.12.15	0–10	0–0.8	0.254
			10–25	0–1.2	0.872
	4	17.12.15–21.02.16	0–10	0–1.2	0.555
			10–25	0–1.2	1.27
	5	28.02.16–06.04.16	0–10	0–1.2	0.237
10–25			0–4.0	4.10	

верхностные волны регистрировались в течение 1 часа. Тем не менее, никакого увеличения значений γ и S среды не наблюдалось (см. рис. 1, табл. 1). Наоборот, отмечено исчезновение областей слабых аномалий показателя анизотропности γ во 2-м интервале наблюдений в диапазоне глубин 13.5–31.0 км.

Ослабление анизотропности и напряженности среды отмечается и после разрушительного землетрясения, произошедшего в Турции 21.10.2011 г. с $M > 7.0$. Значения показателя анизотропности γ в 5-м интервале наблюдений в диапазоне глубин 1.45–31.0 уменьшаются, а значение напряженного состояния S становится в целом на порядок и ниже, чем в 4-м интервале времени до регистрации поверхностных волн от Фукусимского землетрясения (см. табл. 1, рис. 1).

Таким образом, геологическая среда в пределах Нижегородского полигона стала практически изотропной под влиянием высокоамплитудных низкочастотных поверхностных волн от далеких катастрофических землетрясений. Уменьшение значений геодинамических показателей можно связать с особенностями геологического и глубинного строения земной коры: разломы отсутствуют, строение глубинных слоев практически не нарушено.

Авторы полагают, что внешние сейсмические события, в т.ч. катастрофического уровня, не влияют на геодинамические показатели района Нижегородской АЭС, и поэтому ожидать местных землетрясений в рассматриваемом районе не приходится.

По сравнению с сейсмоактивным регионом Кавказских Минеральных Вод значения показателя S рассматриваемого района меньше в 50–

100 раз [16], что позволяет отнести район Нижегородской АЭС к асейсмичным.

На **Кольском полигоне** СЭМ проводился в два этапа: 2013–2014 гг. и 2015–2016 гг. (табл. 2). Геодинамические значения показателей γ и S были получены для двух диапазонов глубин земной коры: 0–10 км и 10–25 км. Для пяти временных интервалов наблюдения были построены 3-мерные модели геодинамического показателя γ (рис. 2).

В первых двух временных интервалах наблюдения в 2013–2014 гг. значения показателя анизотропности изменялись в небольших пределах $\gamma = 0.2–0.6$ (см. рис. 2 а, б), а максимальные значения показателя напряженного состояния S не превышали 0.219. Существенно повышенные значения показателей γ и S были отмечены в остальных 3-х интервалах наблюдений (см. рис. 2 в, г, д; табл. 2), а в 5-м они возросли до максимальных значений на глубинах 10–25 км: $\gamma = 4.0$ и $S = 4.1$. Такие высокие значения не характерны для платформенных районов, к которым относится полигон Кольской АЭС-2. Они близки к значениям Кавминводского сейсмоактивного региона [16].

Авторы полагают, что на напряженное состояние геологической среды в пределах Кольского полигона повлияло катастрофическое Индонезийское землетрясение, произошедшее 13.02.2016 г. с магнитудой $M = 7.8$ [14, 15], что и отразилось в высоких значениях показателей γ и S . После этого землетрясения в изучаемом районе регистрировались интенсивные низкочастотные поверхностные волны, которые, по всей видимости, и стали причиной возникновения областей повышенных напряжений в юго-восточной части Кольского полигона в 5-м интервале времени наблюдения (28.02.16–06.04.16) на обоих рассмат-

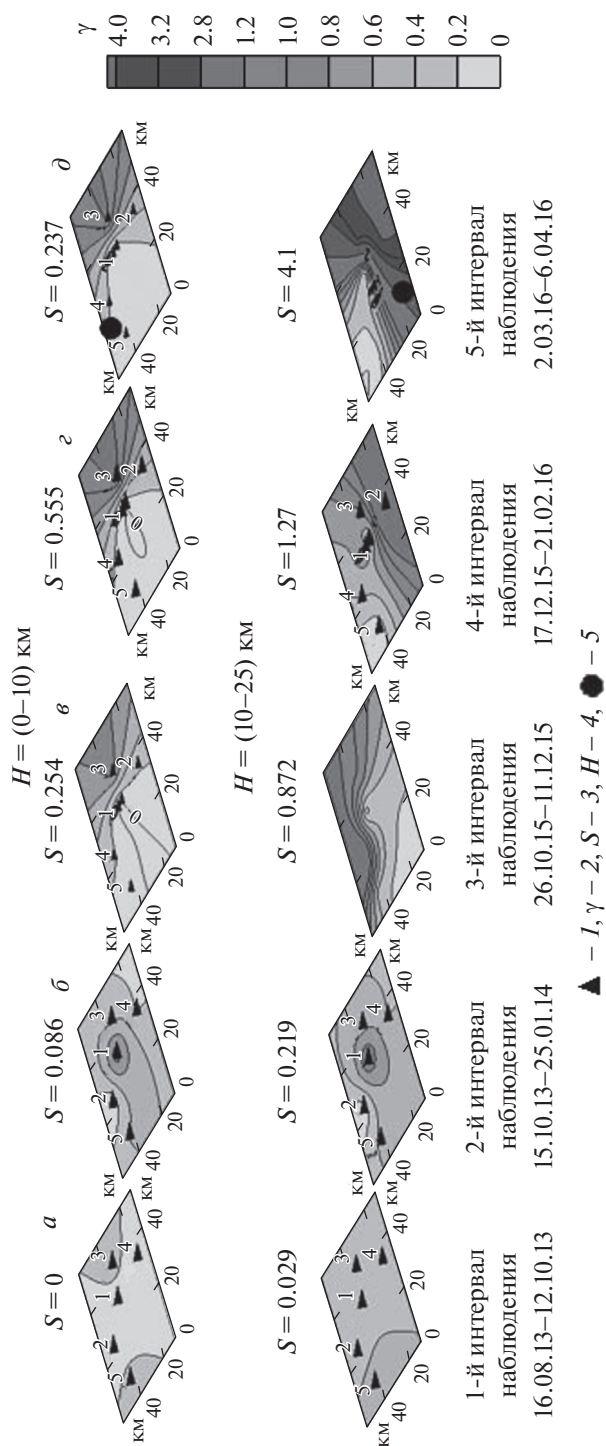


Рис. 2. Трехмерные модели распределения геодинамических показателей γ и S в разные интервалы наблюдений 2013–2016 гг. на Кольском полигоне. Условные обозначения: 1–4 – см. рис. 1, 5 – местные землетрясения, произошедшие в пределах полигона за время наблюдения.

риваемых уровнях глубин. Разрядка этих напряжений проявилась двумя местными землетрясениями.

Первое землетрясение произошло 28.02.2016 г. с магнитудой $M = 2.1$, его очаг находился на глубине 25 км. Второе землетрясение случилось 03.04.2016 г. с магнитудой $M = 1.2$, очаг которого находился на глубине 8 км (см. рис. 2 д). Природа этих землетрясений определяется как наведенная, связанная с внешним воздействием на геологическую среду сейсмических поверхностных волн от Индонезийского землетрясения.

Таким образом, геологическая среда Кольского полигона оказалась чрезмерно восприимчивой к внешнему сейсмическому воздействию – далекому катастрофическому землетрясению. Возможно, что такая чувствительность среды обусловлена особенностями глубинного строения земной коры рассматриваемого района: средняя часть коры интенсивно нарушена разломами. Мы полагаем, что район Кольской АЭС-2 сейсмически восприимчив к внешним сильным землетрясениям и техногенным взрывам, происходящим на рудниках, и поэтому может быть отнесен к сейсмически опасным.

На *Тверском полигоне* СЭМ проводился в течение 7 месяцев 2012–2013 гг. Геодинамические показатели S и γ были оценены для пяти интервалов наблюдения (табл. 3, рис. 3) и 4-х диапазонов глубин земной коры (км): 0–2.5; 2.5–10; 10–22 и 22–32.5; построены 3-х мерные пространственно-временные модели изменения этих показателей (рис. 3). Интервалы наблюдения выбирались с учетом достаточности для обработки кондиционного фактического материала и с учетом возможности оценки влияния такого внешнего фактора как катастрофическое далекое землетрясение.

В первых двух временных интервалах наблюдения в слое 0–2.5 км показатель анизотропности γ не превышал 0.33, а $S = 0$. В течение последующих интервалов времени наблюдения в пункте 1, где расположена проектируемая площадка Тверской АЭС-2, была зафиксирована аномалия анизотропности, не превышающая $\gamma = 1.5$, при этом значение показателя напряженного состояния S не превысило 0.27. Если сравнить эти показатели с другими полигонами, то это изменение можно рассматривать как не существенное, не приводящее к каким-либо последствиям.

Более сложная картина изменения напряженного состояния во времени в верхней консолидированной части земной коры была отмечена в слое с диапазоном глубин 10–22 км (см. табл. 3, рис. 3). В 1-м и 5-м пунктах наблюдения, т.е. в пределах проектируемой площадки АЭС-2, $\gamma = 1.6$, а показатель напряженного состояния также невелик и не превышал 0.37. Катастрофическое землетрясение, произошедшее на Аляске 05.01.2013 г. с магнитудой $M = 7.5$, было зарегистрировано на Тверском полигоне на рубеже 1-го и 2-го временных интервалов и сопровождалось

Таблица 3. Геодинамические показатели состояния геологической среды Тверского полигона

Год проведения СЭМ	Номер интервала наблюдений	Временные границы интервалов наблюдения	Диапазон глубин слоев (км)	Показатель степени анизотропности среды (γ)	Интегральный показатель напряженного состояния среды (S)
2012–2013 гг.	1	01.11.12–05.01.13	0–2.5	0–0.1	0
			2.5–10	0–0.54	0.03
			10–22	0–1.6	0.37
			22–32.5	0–1.24	0.23
	2	05.01.13–31.01.13	0–2.5	0–0.33	0
			2.5–10	0–1.05	0.21
			10–22	0–0.5	0.022
			22–32.5	0–1.03	0.4
	3	02.02.13–25.02.13	0–2.5	0–1.5	0.27
			2.5–10	0–1.44	0.39
			10–22	0–2.15	1.11
			22–32.5	0–3.3	1.49
	4	21.02.13–01.03.13	0–2.5	0–1.5	0.26
			2.5–10	0–1.9	0.7
			10–22	0–1.7	0.72
			22–32.5	0–2.1	0.93
	5	01.03.13–04.04.13	0–2.5	0–0.96	0.09
			2.5–10	0–0.79	0.09
			10–22	0–0.72	0.085
			22–32.5	0–2.06	2.2

цугом низкочастотных поверхностных волн, которые тем не менее не привели к значительному изменению геодинамических показателей.

Во время последующих интервалов наблюдения на глубинах 10–32.5 км отмечалось некоторое увеличение показателей анизотропности γ и напряженного состояния S соответственно от 1.5 до 3.3 и от 0.085 до 2.2. Это поле напряжений не является наведенным от катастрофических далеких землетрясений, как это имело место в районе Кольской АЭС-2. Увеличение геодинамических показателей на больших глубинах, можно объяснить особенностью глубинного строения земной коры, выраженной древней и очень протяженной вещественно-структурной неоднородностью – Крестцовско-Валдайским рифейским авлакогеном северо-восточного простирания и его современной активизацией.

Таким образом, далекое катастрофическое землетрясение, произошедшее на Аляске, не вы-

звало изменений в значениях геодинамических показателей (γ и S) в пределах Тверского полигона. Возможно, что в данном случае имеет значение позиция древних вещественно-структурных неоднородностей относительно направления распространения волн, пришедших с Аляски. Однако следует отметить, что данная территория находится в 3–4-х бальной области воздействия землетрясений из сейсмоопасной зоны Вранча. Сложение наведенных напряжений с естественным неотектоническим полем напряжений может привести к увеличению напряжений и активизации местных сейсмических событий.

Результаты сейсмического мониторинга по Тверскому полигону очень близки к результатам оценки геодинамических показателей (γ и S) Московского полигона [16]. Геологическое строение этих двух районов также очень сходно [4, 5]. На Московском полигоне значения показателя анизотропности составляют 2.8, а значения показателя напряженности 1.8–2.08.

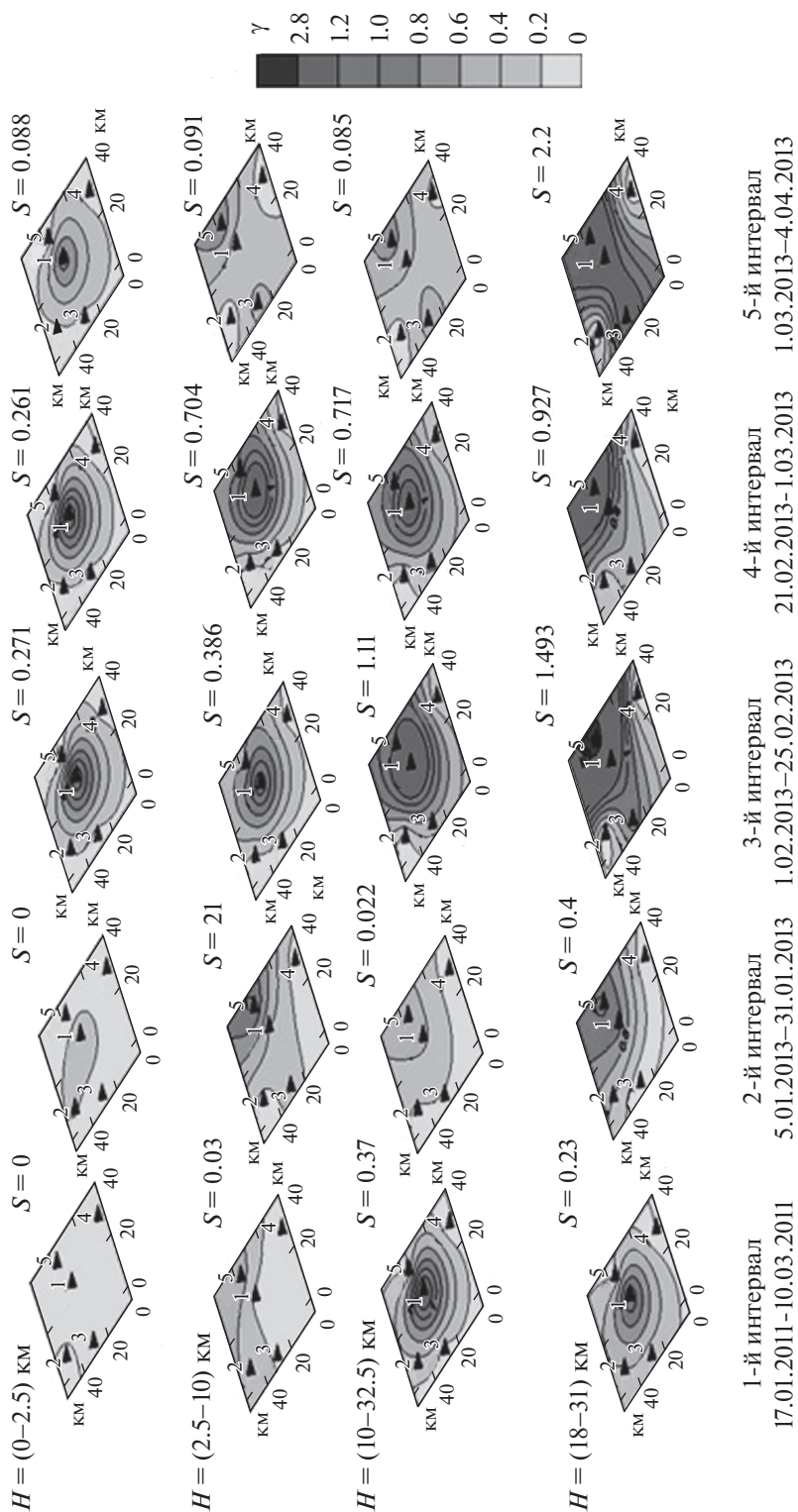


Рис. 3. Трехмерные модели распределения геодинамических показателей γ и S в разные интервалы наблюдений 2012–2013 гг. на Тверском полигоне. Условные обозначения: см. рис. 1.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В ходе сейсмо-экологического мониторинга геологической среды территорий размещения

особо опасных объектов, расположенных в платформенных условиях, получены следующие результаты.

1. В районах, которые максимально удалены от активных горно-складчатых областей (орогенов) и кристаллический фундамент которых погребен и не нарушен разломами, геодинамические значения изменяются очень незначительно ($\gamma = 0-0.78$; $S = 0-0.107$), т.е. относительно ненарушенное строение земной коры не создает условий для появления аномально высоких геодинамических значений. Удаленные катастрофические землетрясения не вызывают, а, напротив, могут ослабить анизотропность и напряженность среды, что отражается в снижении значений показателей γ , S . Район Нижегородской АЭС рассматривается как геодинамически неактивный. Уровень и контрастность изменений геодинамических показателей неактивных асейсмичных районов в 50–100 раз меньше по сравнению с геодинамическими показателями сейсмоактивных районов.

2. Районы со сложным строением древнего кристаллического фундамента (авлакогены, крупные разломы) характеризуются повышенными значениями геодинамических показателей ($\gamma = 1.6-2.06$; $S = 2.0-2.8$). Причина повышения этих значений может иметь разную природу: неотектоническую (естественную) и сейсмическую (влияние удаленных катастрофических землетрясений). В этом случае не исключается наложение (интерференция) разнородных напряжений с появлением дополнительных аномальных напряжений, которые регистрируются в виде областей повышенных геодинамических показателей. В этой связи для района Тверской АЭС и строительства высотных зданий Московского мегаполиса [19] рекомендуется проведение сейсмо-экологического мониторинга с детальной сетью расположения станций сейсмических наблюдений.

3. Районы, в которых отсутствует осадочный чехол (древние щиты и массивы) и в глубинном строении земной коры которых отмечается вертикальная и горизонтальная делимость, характеризуются контрастными увеличениями геодинамических показателей (γ до 4.0; S до 4.10), сопоставимыми со значениями сейсмоактивных регионов. Увеличение этих значений связывается с влиянием на геологическую среду рассматриваемых районов далеких катастрофических землетрясений, которые могут вызвать проявление местной сейсмической активности. В этой связи для района Кольской АЭС-2 необходим постоянный сейсмо-экологический мониторинг, поскольку по своим геодинамическим показателям он близок к сейсмоактивному региону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антикаев С.Ф., Мирмович Э.Г., Рузайкин А.И. Сейсмическая активность Восточно-Европейской платформы как возможный источник чрезвычай-

ных ситуаций в мегаполисах // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 9. С. 27–36.

2. Аракелян Ф.О., Неядько В.В., Лаврик Е.В., Ракитов В.А. Сейсмический мониторинг на Кольском полигоне с использованием локальной сейсмологической сети // Матер. XX Всерос. конф. с междунар. уч. “Грубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов”. Воронеж: Научная книга, 2016. С. 51–54.
3. Барсуков О.М. Годичные вариации сейсмичности и скорости вращения Земли // Физика Земли. 1994. № 4. С. 96–98.
4. Владимирова Т.В., Капустин И.Н., Федоров Д.Л. Глубинная структура центральных районов Восточно-Европейской платформы // Геотектоника. 1997. № 3. С. 31–40.
5. Владимирова Т.А., Капустин И.Н., Федоров Д.Л. Основные этапы геологической эволюции Московской синеклизы // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 1998. № 11. С. 2–7.
6. Гук Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 4. С. 804–815
7. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 216 с.
8. 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.
9. Жигалин А.Д., Николаев А.В. Особенности сейсмичности Восточно-Европейской платформы // Геоэкология. 2012. № 5. С. 449–454.
10. Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорошко А.Л., Суханова Т.В., Коробова И.В. Геодинамические системы и геодинамически активные зоны Восточно-Европейской платформы // Бюлл. МОИП. Отд. геол. Т. 91. Вып. 4–5. 2017. С. 13–27.
11. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. 222 с.
12. Печерский Д.М. Инверсии геомагнитного поля, плюмы и изменения органического мира в фанерозое: удивительные совпадения // Физика Земли. 2003. № 1. С. 53–56.
13. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земли. М.: Недра, 1997. 256 с.
14. 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. Сб. трудов восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Изд-во Мир, 2007. С. 200–204.
15. 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.

16. 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.
17. Попова О.Г., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В., Лаврик Е.В. Изучение геодинамики и оценка напряженного состояния среды в районе проектируемой Нижегородской АЭС по материалам сейсмо-экологического мониторинга // Матер. Сергеевских чтений. Вып. 18. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. М.: РУДН, 2016. С. 193–197.
18. Попова О.Г., Makeev 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.
19. Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А., Шпекторова О.А. Сейсмическое микрозонирование территории г. Москвы для высотного строительства // Геоэкология. 2011. № 4. С. 319–327.
20. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–21.
21. Тюпкин Ю.С. Модулирование слабой сейсмичности приливными деформациями перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 3–10.
22. Шнейерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. М.: ГЕРС, 2006. 160 с.
23. Crampin S.A. Review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media // Wave motion. 1981. № 3. P. 343–391.

GEODYNAMIC ASSESMENT OF PLATFORM AREAS BY THE RESULTS OF SEISMIC ECOLOGICAL MONITORING

O.G. Popova^{a,*}, V.M. Makeev^a, M.G. Popov^{b,**}, F.O. Arakelyan^{c,***}, and V.V. Nedyad'ko^c

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

^bGeological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

^cAtomseismoizyskaniya Ltd., ul. Skakovaya 32-2, Moscow, 125040 Russia

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

**E-mail: mgpopov@list.ru

***E-mail: asi_47@mail.ru

For the purpose of providing seismic and ecological safety of the territories of especially dangerous objects, the authors have identified and evaluated the geodynamic indices of the anisotropy γ and the stress state S , the increased values of which are associated with the emergence of local seismic zones. The assessment of these indicators is based on the results of seismo-ecological monitoring, arranged for selecting the most secure sites for the construction of nuclear power plants. The field data obtained during the monitoring were analyzed according to the method of studying the medium's geodynamics by the energy characteristics of PS waves from distant earthquakes developed at the IEG RAS (Moscow). A comparative analysis of the geodynamic indicators for the regions of three nuclear power plants located in the different regions of the East European platform showed that geodynamic indicators may increase and decrease depending on the impact of distant catastrophic earthquakes on the geological environment and the neotectonic (natural) activity in the region. The degree of neotectonic activity depends on the distance of the considered region from the sources of tectonic forces and stresses, i.e., mountain-folded regions (orogens) and intraplateform geodynamic foci. The specific geological and deep structure of the earth's crust, represented by aulacogenes and fault zones, stratification and its vertical divisibility, also create additional conditions for increasing geodynamic indicators and, accordingly, the appearance of areas of increased seismic hazard in the study area.

Key words: geodynamics, indices of anisotropy and stress, seismicity, seismic and ecological monitoring

REFERENCES

1. Aptikaev, S.F., Mirmovich, E.G., Ruzaiкин, A.I. Seismic activity of the East European platform as a possible source of emergencies in megacities. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2012, no.9, pp. 27–36. (in Russian)
2. Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V., Lavrik, E.V., Raki-tov, V.A. Seismic monitoring at the Kola landfill using a local seismic network. *Materialy XX Vseros. Konf. S mezhdunarodnym uchastiem "Glubinnoe stroenie, miner-ageniya, sovremennaya geodinamika i l seismicnost' Vostochno-Evropeiskoi platform i sopredel'nykh regionov* [Proc. XX All-Russia conference with international participation "Deep structure, mineralogy, modern geodynamics and seismicity of the East European platform and adjacent regions"]. Voronezh, Nauchnaya kniga, 2016, pp. 51–54. (in Russian)

3. Barsukov, O.M. Annual variations of seismicity and rotation speed of the Earth. *Fizika Zemli*, 1994, no. 4, pp. 96–98. (in Russian)
4. Vladimirova, T.V., Kapustin, I.N., Fedorov, D.L. Deep structure of the central regions of the East European Platform. *Geotektonika*, 1997, no. 3, pp. 31–40. (in Russian)
5. Vladimirova, T.A., Kapustin, I.N., Fedorov, D.L. The main stages of the geological evolution of the Moscow syncline. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh mestorozhdenii*. Moscow, OAO VNIOENG, 1998, no. 11, pp. 2–7. (in Russian)
6. Gik, L.D. Physical modeling of the propagation of seismic waves in porous and fractured media. *Geologiya i geofizika*, 1997, vol. 38, no. 4, pp. 804–815 (in Russian)
7. Dobrovolskiy, I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [The theory of preparation of a tectonic earthquake]. Moscow, IFZ AN SSSR Publ., 1991, 216 p. (in Russian)
8. Egorin, A.V. The structure of the Earth's crust by seismic geotraverses. *Glubinnoe stroenie terriorii SSSR* [The Deep Structure of the Territory of the USSR] Belousov, V.V., Pavlenkova, N.I., Kvetkovskaya, G.I., Eds., Moscow, Nauka, 1991, pp. 118–135. (in Russian)
9. Zhigalin, A.D., Nikolaev, A.V. Features of the seismicity of the East European platform. *Geoekologiya*, 2012, no. 5, pp. 449–454. (in Russian)
10. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Dorozhko, A.L., Sukhanova, T.V., Korobova, I.V. Geodynamic systems and geodynamically active zones of the East European Platform. *Bull. MOIP. Otd. geol.*, 2017, vol. 91, issues 4–5, pp. 13–27. (in Russian)
11. Nikolayev, A.V. *Problemy navedennoi seismichnosti. Navedennaya seismichnost'*. [Problems of induced seismicity. Induced seismicity]. Moscow, Nauka, 1994, 222 p. (in Russian)
12. Pecherskii, D.M. Inversion of the geomagnetic field, plumes and changes in the organic world in the Phanerozoic: amazing coincidences. *Fizika Zemli*, 2003, no. 1, pp.53–56. (in Russian)
13. Pomerantseva, I.V., Mozzhenko, A.N. *Seismicheskie issledovaniya s apparaturai Zemlya* [Seismic studies with equipment Earth]. Moscow, Nedra, 1997, 256 p. (in Russian)
14. Popova, O.G., Seryi, A.V., Konovalov, Yu.F., Nedyadko, V.V. Influence of catastrophic earthquakes on the stressed state of the remote territories' environment. *Geofizika XXI stoletiya: 2006 g. Sbornik trudov 8 geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo* [Geophysics of the XXI century:2006. Proc. the 8th geophysical V.V. Fedynsky Readings]. Moscow, 2007, pp. 200–204. (in Russian)
15. Popova, O.G., Seryi, A.V., Konovalov, Yu.F. The results of long-term seismic monitoring in the seismic region of the Caucasian Mineral Waters. *Geoekologiya*, no. 2, 2008, pp. 135–140. (in Russian)
16. Popova, O.G., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V., Vasyutinskaya, S.D. Main results on local seismic and ecological monitoring in different regions of the Russian Federation. *Geoekologiya*, no. 6, 2016, pp. 483–496. (in Russian)
17. Popova, O.G., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V., Lavrik, E.V. Study of geodynamics and assessment of the stress state of the environment in the area of the projected Nizhny Novgorod NPP based on seismic-ecological monitoring data. *Materialy Sergeevskikh chtenii. Vyp. 18. Inzhenernaya geologiya i geoekologiya. Fundamental'nye problem i prikladnye zadachi*. [Proc. 18th conference in commemoration of acad. E.M. Sergeev. Issue 18. Engineering geology and geocology. Fundamental problems and applied tasks]. Moscow, RUDN Publ., 2016, pp.193–197. (in Russian)
18. Popova, O.G., Makeev, V.M., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V. Geodynamic state of the environment of planned and operating nuclear power plants located in different tectonically active regions. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2017, no. 4, pp. 99–108. (in Russian)
19. Sevostyanov, V.V., Mindel, I.G., Trifonov, B.A., Ragozin, N.A., Shpektorova, O.A. Seismic microzoning of the territory of Moscow for high-rise construction. *Geoekologiya*, 2011, no. 4, pp. 319–327 (in Russian)
20. Sytinsky, A.D. On the connection of earthquakes with solar activity, *Fizika Zemli*, 1989, no. 2, pp.13–21. (in Russian)
21. Tyupkin, Yu.S. Modulation of weak seismicity by tidal deformations in front of strong earthquakes. *Vulkanologiya i seismologiya*, 2002, no. 3, pp. 3–10. (in Russian)
22. Shneerson, M.B. Introduction to seismic anisotropy: theory and practice. M., GERS, 2006, 160 p.
23. Crampin, S.A. Review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media. *Wave motion*, 1981, no. 3, pp. 343–391.