

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 55:504. 75:550.348

ОЦЕНКА ГЛУБИННОГО И СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
СЕЙСМОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2022 г. М. Г. Попов^{1,*}, В. М. Макеев^{2,**}, О. Г. Попова¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия*

² *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

*E-mail: mgpopov@list.ru

**E-mail: vmakeev@mail.ru

Поступила в редакцию 08.07.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

В статье изложены результаты локального сейсмоэкологического мониторинга геологической среды предгорной области Кавказских Минеральных Вод и площадок Балаковской, Нижегородской и Кольской атомных электростанций, расположенных на Восточно-Европейской платформе. На основе PS-волн от далеких землетрясений эти объекты исследованы относительно геологического строения и современных геодинамических условий. Участки с аномальными показателями преломления этих волн впервые сопоставлены с активными зонами дислокаций. Для геологической среды Кавминвод и Балаковской АЭС по кинематике Р и PS-волн от далеких землетрясений созданы трехмерные модели глубинного и скоростного строения. В результате выявлены линейные высоко- и низкоскоростные контрастные структурные неоднородности, которые интерпретируются в качестве зон разломов и специфических сейсмогенных объемов. Разломы соответствуют зонам перехода от высокоскоростных к низкоскоростным границам распространения обменных волн. Сейсмогенные объемы являются высокоскоростными. Их образование связывается с активностью верхнемантийных интрузий (диапиров), подъем которых вызывает высокие упругие напряжения в слоях земной коры. Для геологической среды Нижегородской и Кольской АЭС построены трехмерные модели геодинамических показателей анизотропности γ и напряженного состояния S для разных временных интервалов. В результате определены аномалии этих показателей, выраженные резким увеличением или снижением иногда почти до нуля показателей анизотропности и напряженного состояния геологической среды. Причиной изменения этих показателей является подвижность (активность) зон тектонических дислокаций. В районе Нижегородской АЭС аномалии геодинамических показателей связываются с зоной растяжения, выраженной сбросовыми трещинами и суффозионно-карстовыми процессами. В районе Кольской АЭС на изменение значений геодинамических показателей повлияло далекое Индонезийское катастрофическое землетрясение с $M = 7.8$. Влияние выразилось негативными процессами в виде наведенной сейсмической активности. Это позволило сделать вывод о повышенной восприимчивости геологической среды района Кольской АЭС к внешним сильным землетрясениям и относительно удаленным техногенным взрывам, происходящим в шахтах и рудниках во время отработки месторождений. Исследования показали, что локальный сейсмоэкологический мониторинг эффективен для выявления, оценки и учета глубинных участков скоростной изменчивости геодинамических показателей, рассматриваемых в качестве сейсмогенных зон. Особенно мониторинг актуален для изучения геологической среды слабоактивных платформенных районов при проектировании особо опасных, технически сложных и уникальных объектов (атомных электростанций, ускорителей ядерных частиц, объектов захоронения РАО и др.) в связи с проблемами наведенной сейсмичности.

Ключевые слова: *обменные волны, трехмерные модели, геодинамические показатели, анизотропность, напряженность, глубинные разломы, активные зоны, сейсмичность, геологическая среда, мониторинг, атомные станции*

DOI: 10.31857/S086978092205006X

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмический мониторинг – это “... *длительные непрерывные или циклические (периодические) наблюдения за изменениями сейсмических характеристик определенного участка геологической среды*” [1], которая, как правило, по вещественному составу, тектоническому строению и геодинамическим условиям формирования является неоднородной, изменчивой по трещиноватости и пористости и насыщенной гидротермальными флюидами. Сейсмические волны особенно от удаленных катастрофических землетрясений в такой среде преломляются неодинаково, что сформулировано в виде положений и принципов, которые широко используются для изучения глубинного и скоростного строения земной коры геофизическими методами. Сформулированные закономерности используются в методе обменных волн землетрясений (МОВЗ), в сейсмической томографии и др. методах изучения геологической среды [10, 19].

Принципы распространения волн использованы при разработке способа оценки напряженного состояния геологической среды с использованием сейсмических записей далеких землетрясений в “Стандарте организации¹...” [2, 18, 20–22]. В его основе лежит определение энергии обменных PS-волн, формализованное в виде геодинамических показателей анизотропности среды γ и интегрального показателя напряженного состояния S (γ , S – безразмерные величины). Показателем анизотропности γ не следует путать с показателем анизотропии [18].

Показатель γ определяется по отношению значений тангенциальной и радиальной энергии записи обменных PS-волн. С его помощью констатируется наличие в среде анизотропности в большей или в меньшей степени. Показатель S рассчитывается на основе оценки порогового уровня δ , превышение которого указывает на увеличение напряженного состояния среды ($\gamma > \delta$) [6, 12, 17].

Комплексный анализ показателей γ , S позволяет выявлять зоны (участки) вещественно-структурных неоднородностей или дислокаций, оценить их геодинамическую активность во времени и с глубиной, включая контроль их сейсмичности [13, 14]. Такой подход к оценке геологической среды был учтен при разработке локального сейсмо-экологического мониторинга (ЛСЭМ), актуального для территорий атомных станций. Мониторинг важен особенно для относительно низко активных равнинных регионов

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>).

при выборе безопасных мест проектирования и строительства особо опасных, технически сложных и уникальных объектов (ГЭС, АЭС и др.) в связи с опасностью наведенной сейсмичности. Помимо территорий АЭС мониторинг позволяет оценить распределение по площади и во времени микросейсмического фона геологической среды городских агломераций.

Цель ЛСЭМ – определение глубинного строения и напряженного состояния геологической среды для оценки геоэкологической безопасности территорий особо ответственных объектов, в том числе снижения риска образования опасных природных явлений и уменьшения потерь от их возникновения.

Для ЛСЭМ организуется полигон с пунктами наблюдений, состоящими из 3-компонентных цифровых сейсмостанций. Площадь полигона обычно составляет 40–60 км² [14]. Длительность наблюдения колеблется от 2 мес до 11 лет в зависимости от задач мониторинга и категории ответственности объекта. Отметим, что обменные PS-волны от далеких землетрясений позволяют изучать глубинные вещественно-структурные неоднородности непосредственно под пунктом наблюдения (п.н.), поскольку лучи, вдоль которых распространяются сейсмические колебания, в этом случае близки к вертикали [10]. По сейсмическим записям от техногенных взрывов, источник которых расположен недостаточно далеко от полигона, глубинное строение трудно оценить, поскольку не ясно, на каком участке среды от источника до приемника произошли изменения.

Цель настоящей статьи – выявление опасных на проявление сейсмической активности зон дислокаций в пределах разных по геологическому строению территории: предгорной сейсмогенной области Кавказских Минеральных Вод и платформенных районов расположения атомных электростанций (Балаковской, Нижегородской и Кольской), по результатам ЛСЭМ, который на этих объектах проводился в течение последних пятнадцати лет.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ИХ ГЛУБИННОГО И СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ

Глубинное и скоростное строение геологической среды области Кавказских Минеральных Вод (Кавминводы) и района Балаковской АЭС, включая происхождение сейсмичности, исследованы по данным PS-волн от далеких землетрясений.

Область Кавминвод расположена на сочленении двух тектонических структур: предгорного Минераловодского поднятия на севере и горной

Лабино-Малкинской моноклинали на юге. Минераловодское поднятие выделяется по поверхности доюрского складчатого палеозойского фундамента, перекрытого чехлом мел-палеогеновых отложений. В современном рельефе к нему приурочены неогеновые горы-лакколиты с абс. отм. вершин более +1000 м. Лабино-Малкинская мезозойская моноклинали отвечает краевому (поперечному) поднятию Скифской плиты, вздернутому во время орогенеза с образованием Скалистого хребта Бол. Кавказа [5, 7].

Глубинное строение земной коры области Кавминвод (абс. отм.), представленное границами доюрского фундамента и Мохоровичича (М) (в абс. отм.), определено по временам запаздывания PS-волн относительно Р-волн [10] (рис. 1).

Граница доюрского фундамента в целом погружается с ЮЗ в СВ направлении с +1 км (гора Бештау) до -5 км (см. рис. 1а). В центральной части Кавминвод граница фундамента осложнена локальным изометричным опусканием с 0 до -2 км (п.н. JU1 и SOV), вокруг которого формируется сопряженное поднятие в виде отдельных возвышений. Такое строение характеризуется как циркумобразное, отвечающее радиально-концентрической структуре с центробежным типом развития.

Положение границы земной коры (М) также изменчиво по глубине (см. рис. 1б). В центральной части Кавминвод устанавливается относительно приподнятый выступ (-44 км), пересекаемый протяженной флексурой СЗ простирания. Она фрагментарно прослеживается по изолиниям -51 и -52 км за пределами рассматриваемой области. К северо-востоку от нее граница М в целом приподнята, к юго-западу — относительно опущена, что можно квалифицировать в качестве флексуры или флексурно-разломной зоны.

Границы доюрского фундамента и подошвы земной коры дискордантны относительно друг друга. Над выступом границы М в доюрском фундаменте выделяется опускание, а в рельефе, наоборот, — поднятие с неогеновыми горами-лакколитами (Бештау, Два Брата, Лохматая и др.). Такое строение предполагает наличие верхнемантийного диапира, вызывающего вертикальное сжатие земной коры [5]. Рост диапира вызывает отток глубинного вещества от центра выявленного опускания в стороны, что приводит к утолщению земной коры и формированию сопряженных возвышений. Под влиянием процессов перетока глубинного вещества формируется радиально-концентрическая структура, к которой приурочены гипабиссальные поднятия гор-лакколитов.

Скоростное строение земной коры определялось по временным задержкам Р-волн от регионального годографа с привлечением метода сейсмической томографии (рис. 2) [5, 19]. В верхней

части земной коры в интервале глубин 0–7 км выделяется резко контрастная высокоскоростная структура 5.4–5.6 км/с СЗ простирания (см. рис. 2а). Перепад высокоскоростных и низкоскоростных структур составляет 0.2–0.7 км/с. Корни этой структуры прослеживаются на глубину до 18 км, где она становится более отчетливой и протяженной. Скорость Р-волн здесь 5.7–5.9 км/с (см. рис. 2б). Согласно сейсмической томографии, на глубине 30 км, где распространена низкоскоростная кора (6.3 км/с), резко контрастная (аномальная) структура почти редуцирует (см. рис. 2в). Протяженность этой структуры не определена из-за ее простирания за пределы рассматриваемой территории, а ширина, устанавливаемая по ограничению низкоскоростными структурами, составляет от 20 до 30 км.

Анализ сейсмичности показал, что гипоцентры большинства землетрясений тяготеют к рассматриваемой протяженной аномальной структуре (Н = 7–18 км) и, особенно, к ее центральной части, где выделяется высокоскоростное ядро (5.9–6.1 км/с). Не исключается, что формирование ядра связано с внедрением верхнемантийного диапира, приводящим к объемной концентрации упругой энергии. Разрядка этой энергии выражается землетрясениями [3, 6]. Согласно представлениям А.Г. Гамбурцева и И.П. Добровольского, ядра такого типа обладают свойствами сейсмогенной коры [1, 3].

Очаги сильных землетрясений Галийского, Спитакского, Казанджигского, Дагестанского и др. сейсмоактивных районов также приурочены к крупным высокоскоростным объемам (ядрам) — накопителям упругой энергии [4, 11]. Особенно они тяготеют к градиентным зонам контрастных скоростей продольных волн, схожим с более меньшим по размеру кавминводским сейсмогенным объемом. Малые геометрические размеры этого объема, очевидно, отразились на более низком энергетическом классе сейсмических событий.

Район Балаковской АЭС (Бал АЭС) расположен в зоне сопряжения погребенной Волго-Уральской антеклизы и Прикаспийской синеклизы, перекрытых мезозой-кайнозойскими отложениями. Площадка АЭС находится на низком левобережье р. Волга на II надпойменной террасе. Ее долина согласуется со Средневожской геодинамически активной зоной, приуроченной к сочленению Приволжского субмеридионального и Каменно-Сыртского субширотного поднятий [8]. Несогласное сочленение по-разному простирающихся структур вызывает в активной зоне концентрацию левосдвиговых напряжений и сейсмичность.

Глубинное строение земной коры характеризуется деформациями, выраженными в поверхности докембрийского кристаллического фунда-

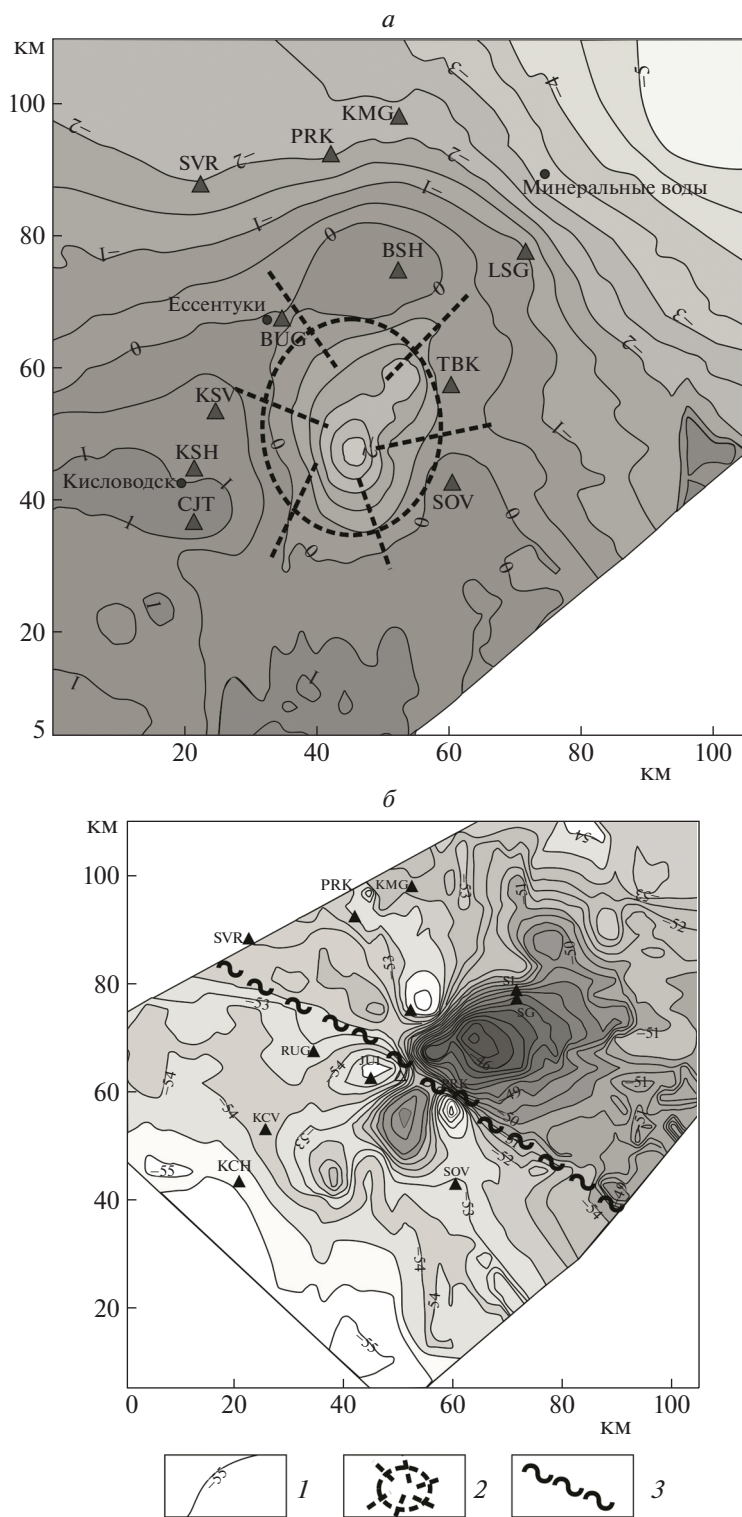


Рис. 1. Глубинное строение области Кавминвод: *а* – граница палеозойского доюрского фундамента (сечение горизонталей через 0.5 км), *б* – граница Мохоровичича (М) как подошва земной коры (сечение горизонталей через 1.0 км). 1 – изолинии глубин (км), 2 – радиально-концентрическая структура, 3 – флексурно-разломная зона. Треугольниками показаны пункты сейсмостанций (BSH, KCN, KMG и другие, обозначенные прописными латинскими буквами). Пункт BSH расположен на горе Бештау высотой +1401 м.

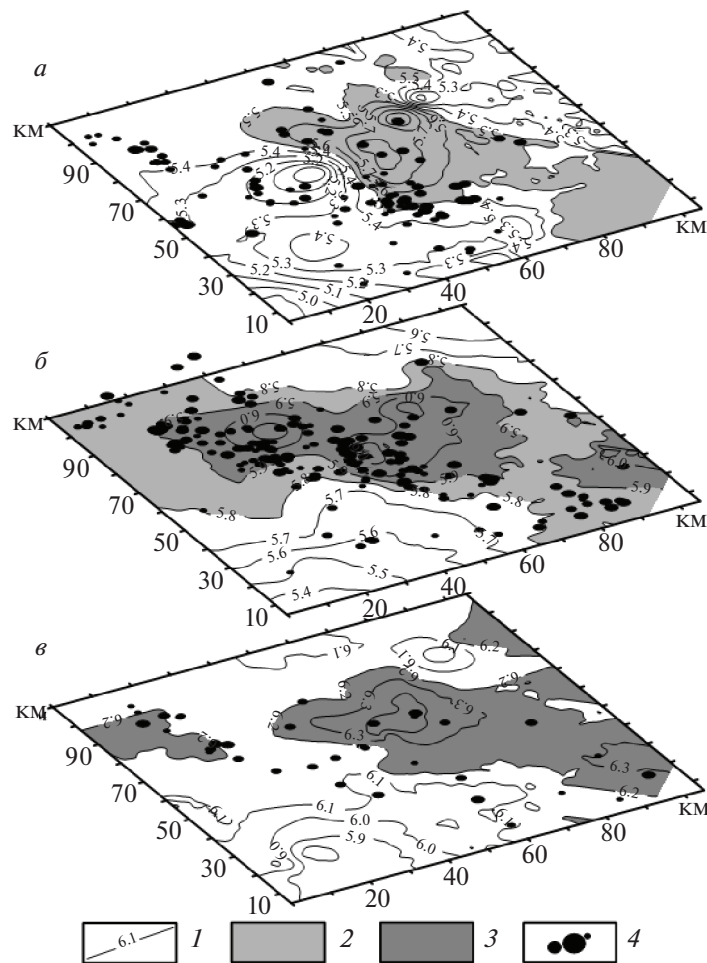


Рис. 2. Трехмерная скоростная модель геологической среды Кавминвод. Интервалы глубин (Н, км): а – 0–7; б – 7–18; в – 18–30. 1 – изолинии скорости обменных Р-волн в км/с (сечение изолиний через 0.2 км/с). Структурные аномалии: 2 – низкоскоростная 3 – высокоскоростная со свойствами сейсмогенной коры, 4 – эпицентры землетрясений.

мента (граница Φ) и подошвы земной коры (граница М) (рис. 3).

Положение границы Φ изменчиво по латерали. В восточной части рассматриваемого района она приподнята до отметок 1.6 км, а в северо-западной части опущена до глубин более 3.0 км (см. рис. 3а). В южной части граница этих структурных форм выражена отчетливой структурной ступенью (п.н. 8 и 10), которая по простиранию в северном направлении на границе поднятия и понижения редуцирует, возможно, по причине влияния разлома северо-восточного простирания. Его наличие подтверждается прерывистостью геологических границ в верхнекоревом слое. В северо-западной части разлом приурочен к границе ступени и поднятия, что, возможно, указывает на его сбросовый тип развития (п.н. 4 и 5).

Граница М также неоднородна (см. рис. 3б). В юго-восточной части она приподнята до 33.0 км, а в северо-западной части опущена более чем до

35.0 км. Сопряжение этих структурных форм выражено в виде зоны СВ простирания, которая согласуется с разломом кристаллического фундамента и со Средневожской активной зоной левосдвиговых напряжений [8].

Разноглубинные деформации границ М и Φ не скоординированы между собой. Поднятие границы Φ как бы повернуто против часовой стрелки относительно более глубинного поднятия границы М. Движение по типу послыоного вращения, возможно, привело к образованию в тылу поднятия границы Φ структурной ступени и разлома сбросового типа, согласного со Средневожской активной зоной. В ней устанавливаются непротиворечивые с типом вращения левосдвиговые напряжения и деформации, т.е. так же против часовой стрелки.

Скоростное строение земной коры района Балаковской АЭС выявлено до глубины 45 км на основе распределения скоростей Р-волн (км/с). По

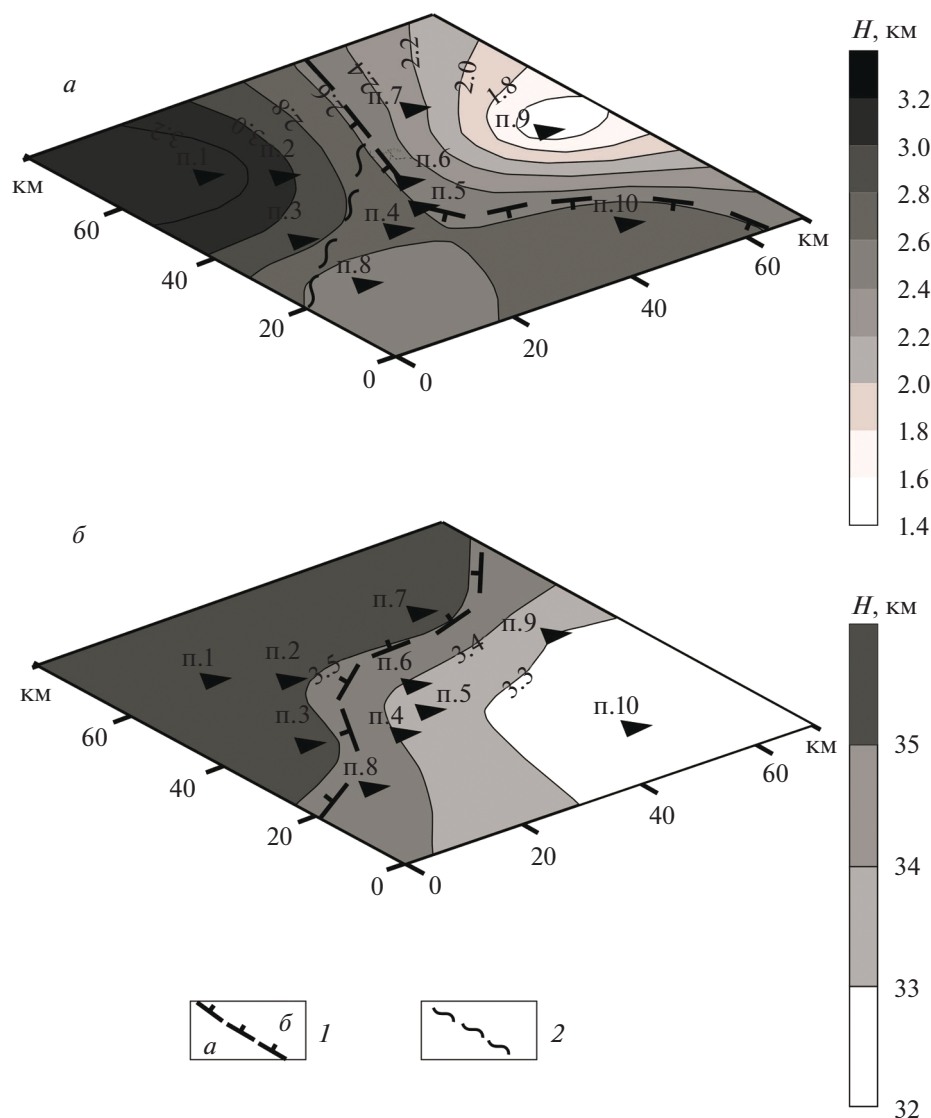


Рис. 3. Строение глубинных границ района Балаковской АЭС: *а* – граница поверхности докембрийского кристаллического фундамента Φ (сечение горизонталей через 0.2 км), *б* – граница Мохоровичича (М), сечение горизонталей через 1.0 км. Структурные формы: 1 – поднятие (*а*) и опускание (*б*); 2 – разлом в кристаллическом фундаменте. Треугольники – пункты сейсмостанций (п.1, п.3 и т.д.).

распределению волн выделяется два интервала глубин: 0–25 км и 25–45 км.

На глубине 0–25 км по незначительному перепаду скоростей 0.2–0.3 км/с установлена низко контрастная широтная структура. Относительно высокие скорости более 7.0 км/с устанавливаются в ее центральной части (рис. 4). Однако низко контрастный перепад скоростей от центральной части структуры к ее периферии не позволяет относить ее к категории сейсмогенных. Структура особенно отчетливо выражена на глубинах 5–15 км и менее 15–25 км. Западная ее часть совпадает с разломом, выявленным в кристаллическом фундаменте Φ (см. рис. 3а).

На глубине 25–45 км широтная структура меняет свое простирание на северо-восточное (диагональное). На этой глубине по характерному рисунку изолиний устанавливается протяженная субмеридиональная структура высокоградиентного изменения скоростей, которая может отвечать разломной зоне. Диагональная и субмеридиональная структуры пересекаются и создают своеобразный структурный узел, в котором возможна концентрация напряжений (см. рис. 4з), что вызывает необходимость оценки его активности, в том числе методом мониторинга геодинамических показателей (γ , S). Геодинамическая опасность узла усугубляется тем, что сейсмичность в нем может быть наведена от землетрясе-

ний, которые периодически случаются в Средне-Уральской и Северо-Кавказской сейсмоактивных областях [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для районов расположения атомных станций, функционирование которых не всегда безопасно относительно современной активности геологической среды, проведены исследования геодинамических показателей (γ , S) с построением трехмерных моделей. Показатели анизотропности γ и напряженного состояния S получены для разных диапазонов глубин и временных интервалов, что позволило выявить зоны наиболее контрастных их изменений. В основу этой оценки положена авторская методика “Способ оценки напряженного состояния геологической среды с использованием сейсмических записей ...” [15, 16].

Трехмерные модели геодинамических показателей были построены для разных площадок АЭС, расположенных в разных районах Восточно-Европейской платформы: Нижегородской АЭС (Ниж АЭС), проектирование которой временно приостановлено по причине карстово-суффозионной опасности, и Кольской АЭС (Кол АЭС).

Район Ниж АЭС расположен в северо-западной части склона Токмовского докембрийского свода на высоком правобережье р. Ока. Кристаллический фундамент свода перекрыт девонско-пермским осадочным чехлом мощностью 1.1–1.5 км. Свод подвигается воздействием напряжений растяжения, наведенных с запада со стороны Окско-Донского активного прогиба, и сжатия, наведенного с юга со стороны одной из вершин Токмовского свода [8]. Интерференция разнотипных напряжений вызвала образование геодинамически активных зон разного ранга. Одна из них протяженная и наследуется долиной р. Ока, другая – менее протяженная локальная, согласуется с переуглубленным эоплейстоценовым врезом руч. Монаковский.

Для района Ниж АЭС созданы объемные модели анизотропности γ и напряженного состояния S на основе двух интервалов наблюдения: 17.01.2011–10.03.2011 г. и 11.03.2011–05.04.2011 г., и пяти глубинных уровней (Н, км): 0–1.45; 1.45–7.0; 7.0–13.5; 13.5–18.0 и 18.0–31 км (рис. 5).

Повышенная анизотропность с $\gamma > 0.6$ выделена на первом этапе наблюдений в северо-восточной части рассматриваемого района на глубине 13.5–31.0 км. На этой же глубине на втором этапе мониторинга отмечено резкое понижение показателя до почти нулевых значений 0–0.2. При этом локализация остается почти неизменной, что может указывать на наличие в этой части района тектонически подвижной зоны. В современ-

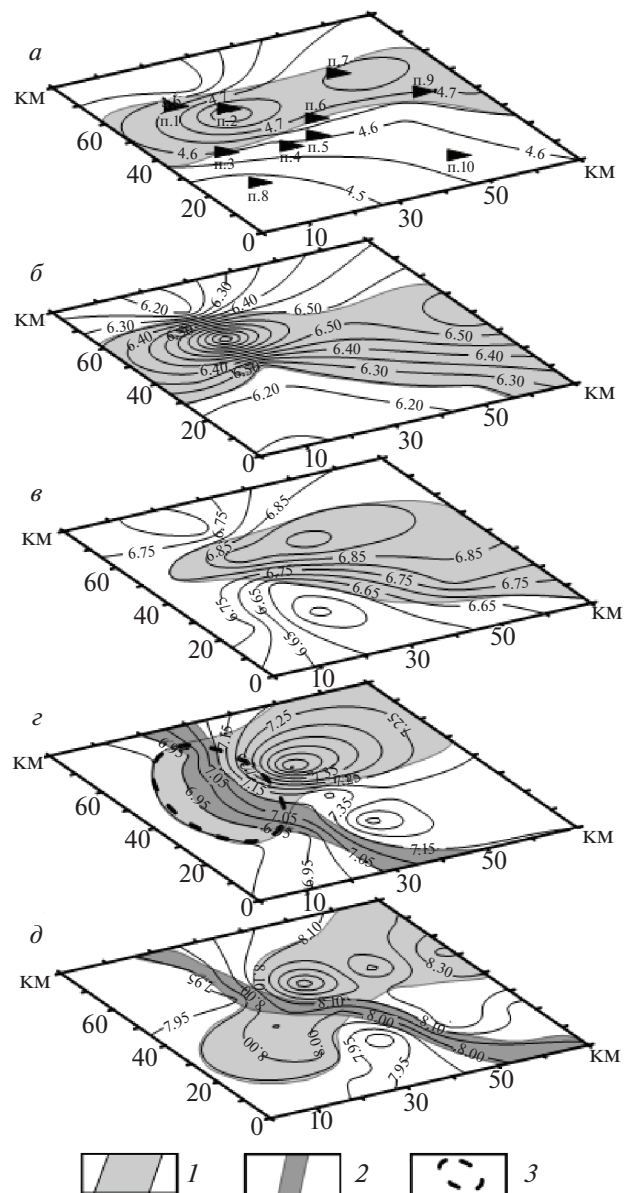


Рис. 4. Скоростная модель строения земной коры района Балаковской АЭС. Интервалы глубин (Н, км): а – 0–5, б – 5–15, в – 15–25, г – 25–35, д – 35–45. Структурные аномалии (зоны дислокаций): 1 – низкоскоростная, 2 – высокоградиентная; 3 – структурный узел пересечения низкоскоростной и высокоградиентной структур. Изолиниями показаны скорости Р-волн (км/с). Треугольники – пункты сейсмостанций.

ном рельефе с ней согласуется Монаковская подвижная (активная) зона. Согласно буровым данным, в этой зоне отмечаются повышенная трещиноватость сбросового типа и гидротермальная активность, которые вызывают интенсивные суффозионно-карстовые процессы в карбонатно-сульфатных пермских отложениях. Эти процессы отчетливо выражены в рельефе в виде воронок.

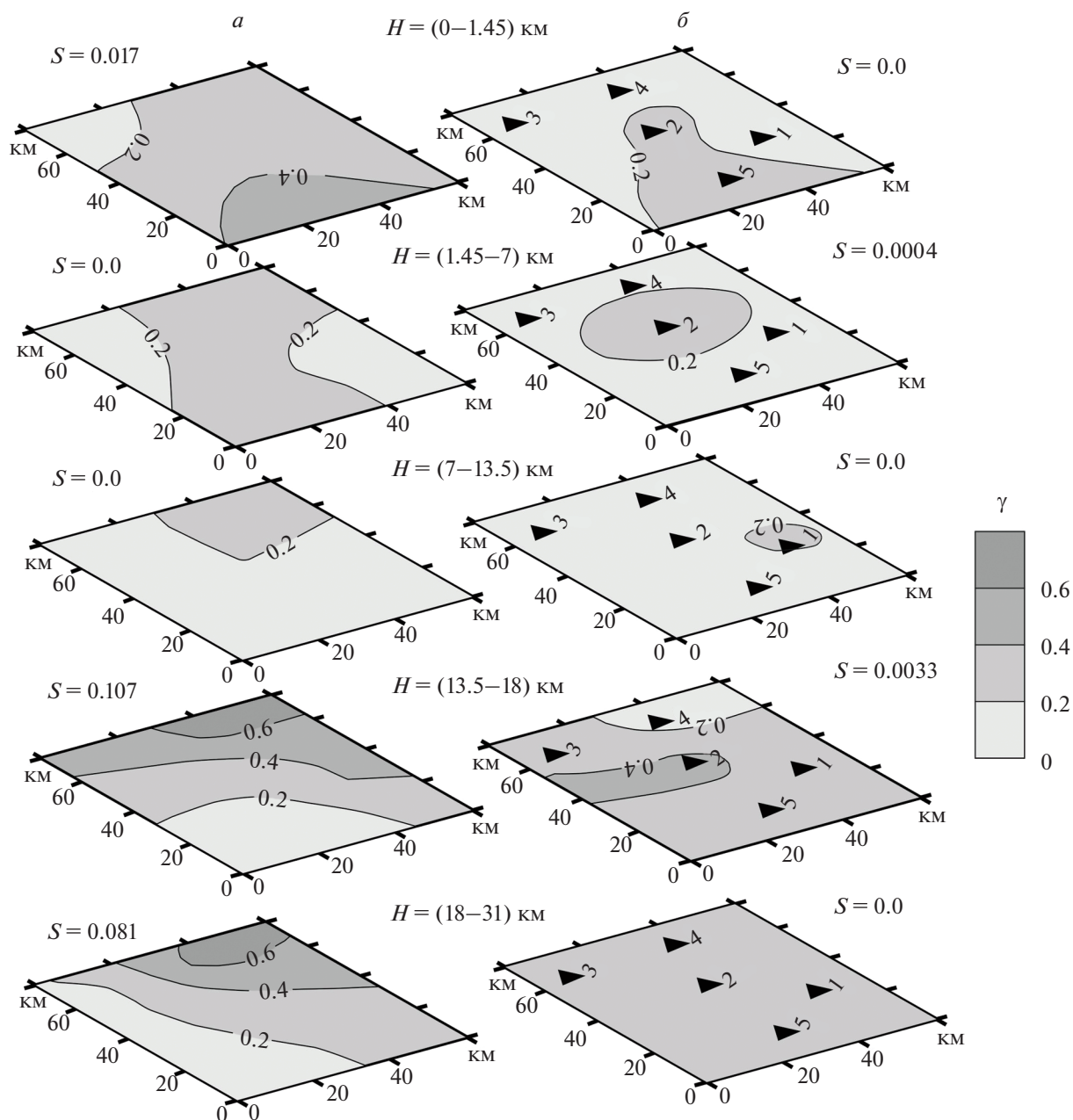


Рис. 5. Трехмерные модели распределения геодинамических показателей района Нижегородской АЭС. Этапы наблюдений: *а* – 17.01.2011–10.03.2011 г., *б* – 11.03.2011–05.04.2011 г. Геодинамические показатели: γ – анизотропность (показана в виде горизонталей с сечением через 0.2), S – напряженное состояние. H – интервал глубин. Треугольники с цифрами – пункты сейсмостанций.

Напряженное состояние S на 1-м этапе наблюдений в целом выше, чем на 2-м. До глубины 13.5 км отмечается постепенное увеличение значений S с 0.017 до 0.107 соответственно, а на глубине 13.5–18.0 км происходит резкое уменьшение S до нуля. Изменение этого показателя, особенно его спад приурочен к Монаковской активной зоне и, возможно, вызван ее активностью. В самой зоне помимо наличия в известняках зон трещиноватости, заполненных кальцитом и гипсом, отмеча-

ются следы миграции углеводородов и повышенные значения emanаций радона.

Район Кол АЭС расположен на северном побережье губы Кунчаст (оз. Экостровская Имандра) на тектоническом выступе (блоке), сложенном архейскими гранито-гнейсами, гнейсами и биотитовыми гнейсами беломорской серии.

Сейсмозоологический мониторинг был проведен в три этапа: 26.10.2015–11.12.2015;

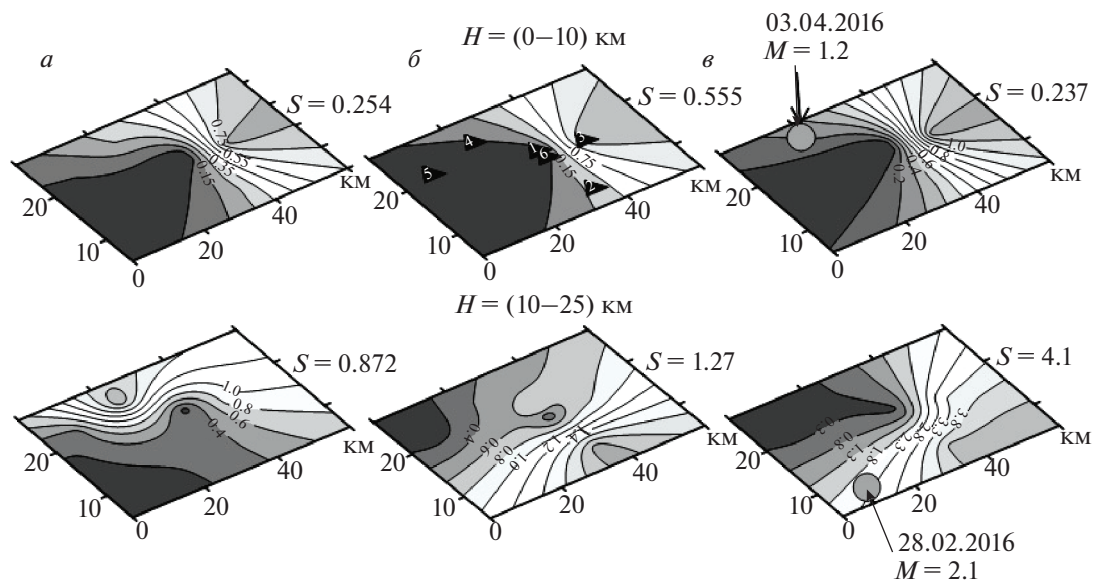


Рис. 6. Трехмерные модели геодинамических показателей района Кольской АЭС. Три этапа наблюдений: *a* – 26.10.2015–11.12.2015, *б* – 17.12.2015–21.02.2016, *в* – 28.02.2016–06.04.2016. Геодинамические показатели: γ – анизотропность (показана в виде горизонталей с сечением через 0.2), S – напряженное состояние; H – интервал глубин. Серые кружочки с датами и магнитудами – землетрясения, произошедшие во время мониторинга. Треугольники – пункты сейсмостанций (1, 2 и т.д.).

17.12.2015–21.02.2016 и 28.02.2016–06.04.2016. Показатели анизотропности γ и напряженного состояния S были получены для двух диапазонов глубин земной коры: 0–10 и 10–25 км (рис. 6). В первом и втором интервалах наблюдений геодинамические показатели изменяются в небольших пределах: γ – 0.15 (0.2)–1.6; S – 0.25–1.27 (см. рис. 6а, б). Во время третьего интервала наблюдений зафиксировано резкое изменение значений γ и S на глубинах 10–25 км, они максимально возросли с 1.2 и 0.237 до 4.0 и 4.1 соответственно (см. рис. 6в).

Одна из причин резкого повышения геодинамических значений – удаленное катастрофическое Индонезийское землетрясение, произошедшее 13.02.2016 г. с магнитудой $M = 7.8$. После регистрации этого землетрясения в районе Кол АЭС в течение 3-го этапа наблюдений были установлены интенсивные низкочастотные поверхностные волны. Колебания вызвали аномальное увеличение геодинамической активности: γ с 1.2 до 4.0, S с 0.237 до 4.1 (см. рис. 6в), которая неожиданно выразилась двумя наведенными землетрясениями 28.02.2016 г. с магнитудой $M = 2.1$ (очаг на глубине 25 км) и 03.04.2016 г. с магнитудой $M = 1.2$ (очаг на глубине 8 км) [9, 12]. Следовательно, геологическая среда района Кольской АЭС сейсмически восприимчива к внешним сильным землетрясениям и техногенным взрывам, происходящим на рудниках. Площадка АЭС подвержена негативному усилению сейсмической актив-

ности наведенного типа, что может сказаться на ее безопасности.

ВЫВОДЫ

В результате локального сейсмоэкологического мониторинга, организованного на полигонах в предгорной области Кавминвод и равнинных районах расположения атомных станций (Нижегородской, Балаковской и Кольской АЭС), созданы трехмерные модели глубинного и скоростного строения геологической среды и оценены геодинамические показатели γ , S . Участки с контрастными показателями впервые сопоставлены с особенностями тектонического строения геологической среды этих объектов.

В области Кавминвод по данным PS-волн от далеких землетрясений выявлены глубинные разломы и высокоскоростные объемы-ядра, обладающие свойствами сейсмогенной коры. Разломы соответствуют зонам перехода от высокоскоростных к низкоскоростным границам распространения обменных волн. Сейсмогенные объемы – это верхнемантийные интрузии, подъем которых вызывает аномально высокие упругие напряжения и деформации в слоях земной коры.

В районе Балаковской АЭС выявлена послонная рассогласованность глубинных деформаций относительно друг друга, которая является причиной концентрации относительно высоких напряжений, сдвиговых деформаций и сейсмической активности.

В районе Нижегородской АЭС определены участки интенсивной изменчивости геодинамических показателей, которые сопоставлены с известными геодинамически активными зонами. С ними связываются опасные для АЭС сгущения проявлений суффозионно-карстовых процессов.

В районе Кольской АЭС установлены относительно высокие значения геодинамических показателей, не характерные для равнинных платформ. Их значения близки к установленным для предгорной Кавминводской сейсмоактивной области.

Полученные результаты указывают на то, что платформенные территории, считающиеся низкоактивными, таковыми в отдельных районах не являются. Это представление крайне важно учитывать при оценке геоэкологической безопасности территорий особо опасных, технически сложных и уникальных объектов, большое число которых расположено на Восточно-Европейской платформе.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. М.: Наука, 1982. 200 с.
2. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 4. С. 804–815.
3. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 216 с.
4. 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.
5. Коновалов Ю.Ф., Попова О.Г., Кухмазов С.У., Минина Н.А., Туйкина А.С. Глубинное строение сейсмической зоны Кавказских Минеральных Вод // Разведка и охрана недр. 2001. № 2. С. 26–29.
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. Новейшая геодинамика Эльбрусско-Минераловодской области Северного Кавказа // Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. С. 99–105.
8. Макеев В.М., Макарова Н.В. Деформации глубинных слоев земной коры Восточно-Европейской платформы: причины и следствия // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 3. С. 57–67.
9. Николаев А.В. Проблемы наведенной сейсмичности. Наведенная сейсмичность. М.: Наука, 1994. 222 с.
10. Померанцева И.В., Мозженко А.Н. Сейсмические исследования с аппаратурой Земля. М.: Недра, 1997. С. 256.
11. 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.
12. Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Недядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние среды удаленных территорий // Сб. трудов восьмых геофизич. чтений им. В.В. Федьнского “Геофизика XXI столетия”. Тверь: ГЕРС, 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., Недядько В.В., Васютинская С.Д. Основные результаты по локальному сейсмо-экологическому мониторингу в разных регионах Российской Федерации // Геоэкология. 2016. № 6. С. 483–496.
15. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Геодинамическое состояние среды территорий, планируемых и действующих атомных электростанций, расположенных в разных тектонически активных областях // Геология и геофизика Юга России. 2017. № 4. С. 99–108.
16. Попова О.Г., Макеев В.М., Попов М.Г., Аракелян Ф.О., Недядько В.В. Оценка геодинамики платформенных территорий по результатам сейсмо-экологического мониторинга // Геоэкология. 2018. № 4. С. 40–52.
17. Попов М.Г., Попова О.Г. Изучение во времени и в пространстве напряженного состояния геологической среды // Геология и геофизика Юга России. 2020. № 10 (3). С. 79–93.
18. Шнейерсон М.Б. Введение в сейсмическую анизотропию: теория и практика. Тверь: ГЕРС, 2006. 160 с.
19. Aki K., Christoffersson A., Husebye E.S. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere // J. Geophys. res. 1977. V. 82. № 2. P. 277–296.
20. Brady B.T. Theory of Earthquake // Pure Appl. Geophys. 1974. V. 112. № 4. P. 701–719.
21. Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media // Wave motion IVO. 1981. № 3. P. 343–391.
22. 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.

LOCAL SEISMO-ECOLOGICAL MONITORING RESULTS IN CONNECTION WITH TO THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT ASSESSMENT

M. G. Popov^{a,#}, V. M. Makeev^{b,##}, and O. G. Popova^a

^a *Lomonosov Moscow State University,
Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991 Russia*

^b *Sergeev Institute of Environmental Geoscience the Russian Academy of Sciences,
Ulansky per., 13 building 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: mgpopov@list.ru*

^{##} *E-mail: vmakeev@mail.ru*

The article presents the results of local seismoecological monitoring of the geological environment in the Caucasian Mineralnye Vody foothills and the Balakovo, Nizhegorodskaya and Kolskaya nuclear power plants (NPP) areas located on the East European platform. Using PS-waves of remote earthquakes, the geological structure and recent geodynamic conditions are studied in these locations. The areas with abnormal wave refraction are correlated for the first time with active dislocation zones. For the geological environment in the Caucasian Mineralnye Vody and Balakovo NPP areas, the three-dimensional models of depth and velocity structures were created using the kinematics of P and PS-waves from distant earthquakes. As a result, the linear high-speed and low-contrast structural heterogeneities were revealed, which are interpreted as fault zones and specific seismogenic areas. The faults correspond to transition zones from high- to low-speed boundaries of converted wave propagation. Seismogenic volumes are high speedy. Their formation is associated with the activity of upper mantle intrusions (diapirs), the rise of which causes high elastic straining in the earth's crust layers. For the Nizhegorodskaya and Kolskaya NPPs geological environment, three-dimensional geodynamic indicators models of anisotropy g and straining state S were built for different time intervals. As a result, these indicators anomalies were detected, pronounced in a sharp rise or reduction (sometimes almost to zero) of the geoenvironment anisotropy and strain-stress state indices. The reason is the mobility (activity) of tectonic dislocation zones. In the Nizhegorodskaya NPP area, the anomalies of geodynamic parameters are related to the extension zone pronounced in dip-slip fault fissures and suffusion-karst processes. In the Kolskaya NPP area, the distant Indonesian catastrophic earthquake with $M = 7.8$ influenced the change in the values of geodynamic indicators. The influence was expressed in the form of induced seismic activity. This permitted us to conclude about the elevated susceptibility of geoenvironment in the Kolskaya NPP area to external strong earthquakes and remote technogenic explosions in ore mines upon the mineral deposit extraction. The research proved that the local seismo-ecological monitoring is effective for identifying, evaluating and taking into account of deep areas with variable geodynamic parameters considered as seismogenic zones. In particular, this monitoring is acute for the geoenvironmental studies in low-active platform regions upon the engineering design of highly responsible, technologically complex and unique facilities (nuclear power plants, nuclear particle accelerators, radioactive waste disposal facilities, etc.), due to the induced seismicity problems.

Keywords: *converted waves, three-dimensional models, geodynamic parameters, anisotropy, straining, deep faults, active zones, seismicity, geological environment, monitoring, nuclear power plants*

REFERENCES

- Gamburtsev, A.G. *Seismicheskiy monitoring litosfery* [Lithosphere seismic monitoring]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 200 p.
- Geek, L.D. *Fizicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya seismicheskikh voln v poristykh i treshchinovatykh sredakh*. [Physical modeling of seismic wave propagation in porous and fractured environments]. *Geology and Geophysics*, 1997, v. 38, no. 4, pp. 804–815.
- Dobrovolsky, I.P. *Teoriya podgotovki tektonicheskogo zemletryaseniya* [The preparation tectonic earthquake theory]. M.: IFZ AN SSSR, 1991, 216 p.
- Egorin, A.V. *Stroyeniye zemnoy kory po seismicheskim geotraversam. Glubinnoye stroyeniye territorii SSSR* [The earth's crust structure according to seismic geotraverses. The USSR territory deep structure] / Ed. V.V. Belousov, N.I. Pavlenkova, G.I. Kvetkovskaya. Moscow, Nauka Publ., 1991, pp. 118–135.
- Konovalov, Yu.F., Popova, O.G., Kukhmazov, S.U., Minina, N.A., Tuikina, A.S. *Glubinnoye stroyeniye seismicheskoy zony Kavkazskikh Mineral'nykh Vod* [The Caucasian Mineralnye Vody seismic zone deep structure]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2001, no. 2, pp. 26–29.
- Krylov, S.V., Mishenkin, B.P., Mishenkina, Z.R. *Detal'nyye seismicheskiye issledovaniya litosfery na P i S volnakh*. [Detailed seismic lithosphere researches on P and S waves.]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993, 199 p.
- Milanovsky, E.E., Rastsvetaev, A.V., Kukhmazov, S.U., Birman, A.S. *Noveyshaya geodinamika El'brusko-Mineralovodskoy oblasti Severnogo Kavkaza* [The latest geodynamics Elbrus-Mineralnyvody region of the North Caucasus]. *Geodinamika Kavkaza* [Geodynamics of the Caucasus]. Moscow, Nauka Publ, 1989, pp. 99–105.
- Makeev, V.M., Makarova, N.V. *Deformatsii glubinnyykh slojev zemnoy kory Vostochno-Yevropeyskoy platformy: slichiny i sledstviya* [The earth's crust deep layers deformations of the East European platform: causes and

- consequences]. *Russian Seismological Journal*, 2020, vol. 2, no. 3, pp. 57–67.
9. Nikolaev, A.V. *Problemy navedennoy seysmichnosti. Navedennaya seysmichnost'*. [The induced seismicity problems. Induced seismicity]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 222 p.
 10. Pomerantseva, I.V., Mozzenko, A.N. *Seysmicheskiye issledovaniya s apparaturou Zemlya*. [Seismic researches with equipment "Earth"]. Moscow, Nedra Publ., 1997, 256 p.
 11. Popova, O.G., Konovalov, Yu.F., Popov, M.G. *Osobennosti struktury zemnoy kory seysmoopasnykh i aseismichnykh regionov po dannym geotraversov (na primere profiley Bazal't, Rubin, Kvarts i Armash-Akhaltsikhe)* [Peculiarities of the earth's crust structure in seismically hazardous and aseismic regions according to geotraverses data (on the Basalt, Rubin, Quartz and Armash-Akhaltsikhe profiles example)], *Volcanology and Seismology*, 1998, no. 4, pp. 178–189.
 12. Popova, O.G., Seriy, A.V., Konovalov, Yu.F., Nedyadko, V.V. *Vliyaniye katastroficheskikh zemletryaseniy na napryazhennoye sostoyaniye sredy udalennykh territoriy* [The catastrophic earthquakes affection on the remote territories environment strain state]. Sat. Proceedings of the eighth Geophysical. readings to them. V.V. Fedynsky "Geophysics of the XXI century". Moscow, 2007, pp. 200–204.
 13. Popova, O.G., Seryi, A.V., Konovalov, Yu.F. *Rezultaty dolgovremennogo seysmicheskogo monitoringa v seysmoopasnom rayone Kavkazskikh Mineral'nykh Vod* [The long-term seismic monitoring results in the Caucasian Mineralnye Vody seismically hazardous zone]. *Geocology*, 2008, no. 2, pp. 135–140.
 14. Popova, O.G., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V., *Vasyutinskaya S.D. Osnovnyye rezultaty po lokal'nomu seysmo-ekologicheskomu monitoringu v raznykh regionakh Rossiyskoy Federatsii* [The local seismoecological monitoring main results in Russian Federation various regions]. *Geocology*, 2016, № 6, pp. 483–496.
 15. Popova, O.G., Makeev, V.M., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V. *Geodinamicheskoye sostoyaniye sredy territoriy planiruyemykh i deystvuyushchikh atomnykh elektrostantsiy, raspolozhennykh v raznykh tektonicheskii aktivnykh oblastiakh* [The territories of designed and operating NPPs natural environment geodynamic state located in various tectonically active regions]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2017, no. 4, pp. 99–108.
 16. Popova, O.G., Makeev, V.M., Popov, M.G., Arakelyan, F.O., Nedyadko, V.V. *Otsenka geo-dinamiki platformennykh territoriy po rezul'tatam seysmo-ekologicheskogo monito-ringa* [The platform areas geodynamics assessment on the seismoecological monitoring results]. *Geocology*, 2018, no. 4, pp. 40–52.
 17. Popov, M.G., Popova, O.G. *Izucheniye vo vremeni i v prostranstve napryazhennogo sostoyaniya geologicheskoy sredy* [Researches in time and space of the geological environment strain state]. *Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2020, no. 10 (3), pp. 79–93.
 18. Shneerson, M.B. *Vvedeniye v seysmicheskuyu anizotropiyu: teoriya i praktika*. [Introduction to seismic anisotropy: theory and practice]. Moscow, GERS Publ., 2006, 160 p.
 19. 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.
 20. Brady, B.T. Theory of Earthquake. *Pure Appl. Geophys*, 1974, vol. 112, no. 4, pp. 701–719.
 21. Crampin, S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media. *Wave motion IVO*, 1981, no. 3, pp. 343–391.
 22. 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.