

УДК 551.248.2

**ОЦЕНКА ТЕКТОНИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
ТЕРРИТОРИИ КУРСКОЙ АЭС МЕТОДАМИ
КОМПЬЮТЕРНОГО ЛИНЕАМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

Г.Н. Иванченко

ИДГ РАН

Работа посвящена использованию компьютерного дешифрирования и основанного на нём линеamentного анализа (LESSA) для поиска признаков активности разломов в ближней зоне площадки Курской АЭС. Используются методы сравнения глобальной и локальной роз-диаграмм линеamentов, методы выделения протяжённых линеamentов и их сравнение с геологической ситуацией, а также рассмотрение и интерпретация линеamentных форм вблизи разломов с предполагаемой активностью. Показано, что вблизи Курской АЭС методами компьютерного дешифрирования и линеamentного анализа достоверные признаки современной ак-

тивности разломов не фиксируются. Район можно отнести к тектонически стабильным в пределах Курского мегаблока Воронежского кристаллического массива.

DOI

Введение

Изучение современной геодинамики Воронежского кристаллического массива Восточно-Европейской платформы дистанционными методами имеет особую значимость из-за строительства и эксплуатации здесь объектов повышенного уровня ответственности, в том числе площадок АЭС, которые выбираются экспертным решением на основе данных, полученных большим набором геолого-геофизических методов. Среди них морфоструктурный и линеаментный анализы достаточно важны, а компьютерный линеаментный анализ в настоящее время является наиболее стандартизированной формой [Иванченко, Горбунова, 2015]. Рассматриваемая в данной работе ближняя зона Курской АЭС относится к Курскому мегаблоку Воронежского кристаллического массива и имеет ярко выраженное двухъярусное геологическое строение: архейско-протерозойский кристаллический фундамент и фанерозойский осадочный чехол. Тектонические деформации кайнозоя рассматриваются как внутриплитные, но с учётом наличия прочностных неоднородностей и включений, причём главной неоднородностью коры здесь является Днепровско-Донецкий авлакоген (ДДА), северный борт которого частично входит в исследуемый район. Структура докембрийского фундамента имеет большое значение, поскольку все разрывные нарушения фанерозоя в пределах Воронежской антеклизы представляют собой активизированные в разное время разломы фундамента. В данной работе продемонстрирована возможность применения компьютерного линеаментного анализа как вспомогательного метода при оценке современной геодинамической обстановки площадки Курской атомной станции. В качестве исходного материала взят космоснимок Landsat с разрешением растеризации около 100 метров для регионального уровня и в первые десятки метров для локального уровня. Таким образом, анализируется одно и то же изображение на разном уровне генерализации.

Методика

В рамках автоматизированного линеаментного анализа термин «линеамент» получил более широкое понятие, чем первоначально в геологии. Линеаментом называется любой линейный элемент растрового изображения, свойства которого описываются процедурой их выделения из изображения. При этом само изображение может иметь самую разную природу: космоснимок, цифровая модель рельефа или некоторое геофизическое поле [Zlatopolsky, 1992]. Линеаменты могут быть малыми, протяжёнными, с перерывами или без них, прямолинейными или изогнутыми. Они подбираются таким образом, чтобы результат был интуитивно похож на геометрическую линию. В ходе выполнения работы использовались космические снимки различного масштаба. Однако применение компьютерного линеаментного анализа для Восточно-Европейской платформы осложнено тем, что это территория интенсивного антропогенного воздействия, что затрудняет вычленение природных линеаментов из техногенного «шума». Поэтому для исследований тектонической активности в этих условиях следует анализировать наиболее статистически

устойчивые характеристики поля линеаментов. Например, глобальную розу-диаграмму распределения линеаментов по направлениям, построенную для всего анализируемого изображения; или так называемые линеаментные формы (линии тока). Линеаментные формы представляют собой линии достоверной вытянутости векторов приведенной результирующей длины (базовое понятие угловой статистики) роз-диаграмм малых линеаментов, построенных в скользящем окне. Эти линии группируются в компактные прямолинейные или плавно изогнутые зоны разной ширины и протяженности. Похожим понятием является линеаментная зона, которая выделяется не линией, а полосой, имеющей некоторую ширину и внутреннюю структуру. Методические основы линеаментного анализа изложены в монографии [Иванченко, Горбунова, 2015].

Оценка неотектонической активности района исследований

Для вертикальных неотектонических движений стратиграфический и морфостратиграфический (с учётом поверхностей выравнивания) методы анализа реперных поверхностей являются основными и детально рассмотрены для района Курской АЭС в работе [Иванченко, Малкин, 2017], где показано, что после накопления полтавской серии миоцена (21–22 млн лет) величина деформаций не превышает первые десятки метров и представлена малоамплитудными пликативными структурами. Можно сказать, что такой тектонический режим не предполагает сколь-нибудь заметной активности разломов на этой территории. Однако полевое обследование зон разломов в ближней зоне Курской АЭС-2 показало, что по косвенным геолого-геоморфологическим признакам возможна активность Субширотного разлома (4 на рис. 1). Для самой Железнодорожной зоны разломов (1 на рис. 1) активной на современном этапе может считаться лишь ее восточная часть. При этом участок, расположенный в непосредственной близости от площадки Курской АЭС-2, малоактивен. Признаки активизации отмечаются только на расстоянии 15–20 км к северу от площадки, и примерно на таком же удалении к югу. Безымянный разлом (3 на рис. 1), повторяющий направление Железнодорожной зоны, проявляет признаки активности только в южной своей части, начиная с места пересечения его Субширотным разломом.

Однако, судя по малой амплитуде деформаций рельефа, интенсивность движений его весьма слабая. В пределах 20 км от площадки зона разлома существенно в рельефе не проявлена. Не выражена она и в геофизических полях. Зона Безымянного разлома выражена на геологических разрезах. Однако и здесь проявление деформаций затрагивает только верхнемеловые отложения и не отражается в верхней части осадочного чехла, что аналогично Железнодорожному разлому, выраженному смещениями по подошве туронских верхнемеловых отложений (~94–90 млн лет), но не затрагивающему кайнозойские осадки. Кроме того, на других участках пересечения разломной зон, расположенных южнее станции, в разрезе не выделяется никаких следов современных подвижек, в том числе и по составу отложений, их структуре и т.д. Все сказанное позволяет утверждать, что в ближней 30 км зоне от площадки Курской АЭС-2 не выделено современных активных разломов. В настоящее время некоторые следы активности Железнодорожной зоны, включая оперяющие, такие как Безымянный разлом, отмечаются в эманациях радона, что позволяет предполагать влияние этих нарушений на гидрогеологический режим с возможной интенсификацией экзогенных явлений (оползни, просадки, овражная эрозия),

характеристик малых линеаментов, исходя из предположения, что часть линеаментов связана с тектонической трещиноватостью.

Наиболее крупная и протяженная зона докембрийского Железнодорожного разлома север-северо-западного простирания, нарушающего фундамент, в новейшей структуре большинством авторов на космоснимках не выделяется. Однако на структурной карте по подошве туронских отложений фрагмент этой зоны отмечается в работе [Друцкой, Кононов, 2001]. То есть в позднемеловое время активность этой зоны разлома ещё заметна. Можно было бы предположить, что эта крупная древняя неоднородность активизируется и в условиях современных неотектонических напряжений и деформаций. Это, в свою очередь, должно было бы проявиться в ходе компьютерного линеamentного анализа как в виде выраженности зоны разлома в «линеamentных формах» вблизи разломной зоны, так и в достоверном различии локальной и глобальной роз-диаграмм трещиноватости.

Предметом настоящей работы является проверка активности Железнодорожного разлома и некоторых прилегающих к нему вблизи площадки АЭС дизъюнктивов (Субширотного и Безымянного) методами компьютерного линеamentного анализа. Мы исходим из предположения, что, если разломы Безымянный, Субширотный и зона Железнодорожного разлома активны в четвертичное время, то они сами и/или их оперяющие могли отразиться в различных характеристиках поля линеаментов.

Обсуждение результатов исследований

Проведенный компьютерный анализ позволил выделить протяженные линеamentы высокого иерархического уровня, отраженные в современном ландшафтном рисунке. На снимок (рис. 2) вынесены пикативные и дизъюнктивные

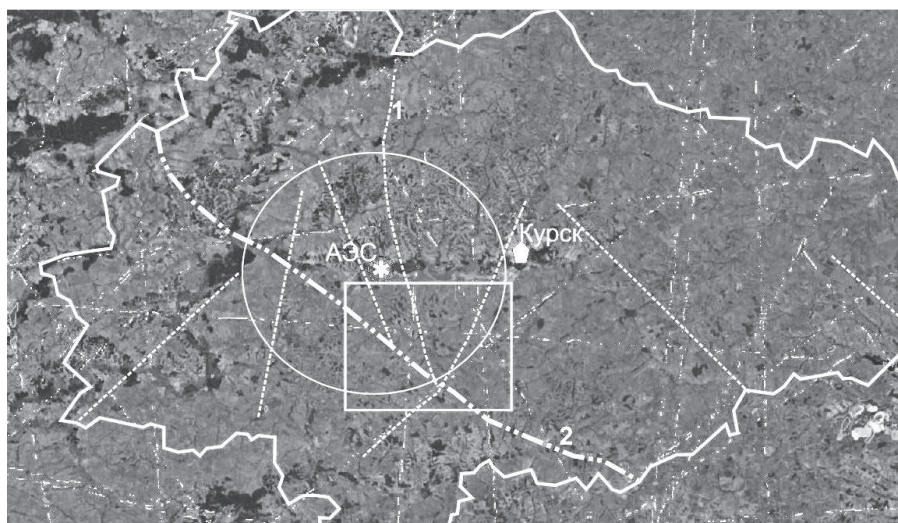


Рис 2. Линеamentный анализ территории Курской области. Белая врезка – район детальных исследований, окружность – 30 км зона. Показаны, выделенные LESSA, протяжённые линеamentы; вынесены активные верхнемеловые разломы (белые прерывистые линии). 1 – Железнодорожный разлом, 2 – верхнемеловая флексура

верхнемеловые (посттуронские) структуры, полученные в результате геологической съемки [Друцкой, Кононов, 2001].

На рис. 2 видно, что среди выделенных протяжённых линеаментов преобладают субмеридиональные простирания. Эти линеаменты, вероятно, отражают структурный рисунок архей-протерозойского фундамента. Линеаментная зона север-северо-восточного простирания, выделенная на западе Курского блока, определяет его границу с Брянским докембрийским мегаблоком. Железнодорожный разлом – сложно построенная дизъюнктивная структура, в линеаментах практически не выражена.

Верхнемеловой тектонический план, восстановленный по подошве туронских отложений, отличен от современного. Структурообразующей является пликтивная флексура северо-западного простирания. Флексура разделяет Щигровский свод Воронежской антеклизы и северный склон Днепровско-Донецкого авлакогена [Друцкой, Кононов, 2001]. К северо-востоку от оси флексуры преобладают разломы северо-западного простирания. К юго-западу от флексуры простирание структур меняется на северо-восточное и север-северо-восточное. Это направление ортогонально простиранию ДДА и соответствует истории формирования этой региональной структуры.

Отметим, что при сопоставлении современных и меловых структур нарушения мелового времени не совпадают с современными протяжёнными линеаментами, выделенными в ходе дешифрирования, за исключением единичного случая (небольшой отрезок линеамента северо-восточного простирания к юго-востоку от флексуры). Субширотный линеамент, к северу от Сеймского долинного комплекса, является ограничителем для нескольких меловых разломов. Кроме того, отметим, что ни один из выделенных по методике LESSA линеаментов не проходит ближе 5 км от АЭС. Этот результат, на наш взгляд, проще всего интерпретировать как отсутствие выраженности в ландшафте и рельефе мезозойских нарушений на современном этапе и, соответственно, как отсутствие их реактивации. В целом, надо отметить, что в условиях техногенных ландшафтов и хозяйственной инфраструктуры Средне-Русской возвышенности компьютерное выделение протяжённых линеаментов по космическим снимкам малоинформативно и следует больше полагаться на устойчивые статистические характеристики полей малых линеаментов низких иерархических уровней, что и выполнено в ходе представленной работы: были проанализированы розы-диаграммы углового распределения малых фотолинеаментов по крупным доменам и «линеаментные формы», определяемые как возможные зоны и локализации деформаций.

Обратимся к анализу роз-диаграмм для Курского блока в целом и для тестового локального участка предполагаемой активизации разломов. На рис. 2 показан район получения методами программы LESSA глобальной (весь снимок) и локальной (врезка для тестового участка) роз-диаграмм, то есть распределение малых линеаментов по направлениям. Для локального участка анализ проводился на изображении лучшего растрового разрешения (первые десятки метров), чем для всего снимка (разрешение которого 100 м). Предполагаемая неотектоническая активность тестового участка определяется тем, что он является районом пересечения основных разломов, определенных при геологической съемке, также на этом участке локализуются места сочленения меловых дизъюнктивных и пликтивных структур. При сопоставлении меловых и современных структурных планов можно видеть их дискордантность. При сравнении роз-диаграмм, построенных по космическим изображениям разных масштабов детализации, можно отметить практически

полную идентичность роз-диаграмм (рис. 3), что можно интерпретировать как статистический критерий отсутствия локальных деформаций.

Действительно, если бы разломы Безымянный, Субширотный и зона Железнодорожного разлома были активны, то они сами и их оперяющие должны были бы отразиться в поле линеаментов и, таким образом, обеспечить различие глобальной и локальной угловой статистики, что достоверно не наблюдается. Несколько более выраженные лучи локальной розы объясняются меньшим объёмом выборки.

Розы-диаграммы имеют два максимума простираций малых фотолинеаментов – субширотное и субмеридиональное. Субширотное направление объясняется тем, что субширотный характер имеют простираения осадочных пластов мезозойского и, отчасти, кайнозойского возраста, имеющих уклон в южном направлении, к Днепровскому палеорифту. Кроме того, в кайнозое морские трансгрессии распространялись с юга, а небольшие изгибовые деформации также определялись давлением с юга, со стороны Альпийского пояса. Современные эрозионные формы долины р. Сейм также имеют субширотное простираение. Таким образом, некоторое преимущество этого направления, которое просматривается на всех масштабных уровнях, весьма естественно.

Вторым преобладающим максимумом вытянутости роз-диаграмм является субмеридиональное. Это направление протяженных линеаментов связано с основными простираениями глубинных разломов фундамента. Такой современный линеаментный рисунок отмечался многими авторами. И.В. Флоринский [Флоринский, 2010] выделил по цифровым моделям рельефа линеаменты для дневной поверхности и для стратиграфических горизонтов осадочного чехла. На поверхности кристаллического фундамента они имеют преимущественно субмеридиональное простираение, на подошве туронского яруса меловой системы – генеральный северо-восточный азимут, хотя встречаются мелкие структуры северного и северо-западного простираения, а на дневной поверхности – преимущественно субмеридионального направления. А.И. Полетаев с соавторами [Полетаев и др., 1992] не исключили, что субмеридиональные линейные элементы современного рельефа могут отражать некоторые элементы глубинной структуры земной коры, связанной с субмеридиональными нарушениями докембрийского кристаллического фундамента, что определяет ясную выраженность меридионального луча как глобальной, так и локальной розы-диаграммы малых линеаментов.

Результаты линеаментного анализа космоснимка для фрагмента к юго-востоку от площадки АС показали следующее (рис. 4).

В линеаментных формах хорошо выражена описанная выше верхнемеловая флексура, установленная по подошве туронских отложений [Друцкой, Кононов, 2001]. Эта мезозойская флексура, разделяющая Щигровское поднятие на северо-востоке и северный склон Днепровского палеорифта, является крупной позднемеловой пликативной структурой, прекрасно выраженной в строении мелового разреза на территории всей Курской области (рис. 2). Линеаментные формы на тестовом участке субпараллельны простираению флексуры, маркируя ее с юго-востока

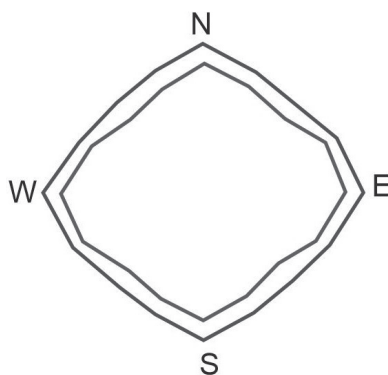


Рис 3. Сравнение региональной розы-диаграммы (внешний контур) и розы-диаграммы тестового участка (внутренний контур)

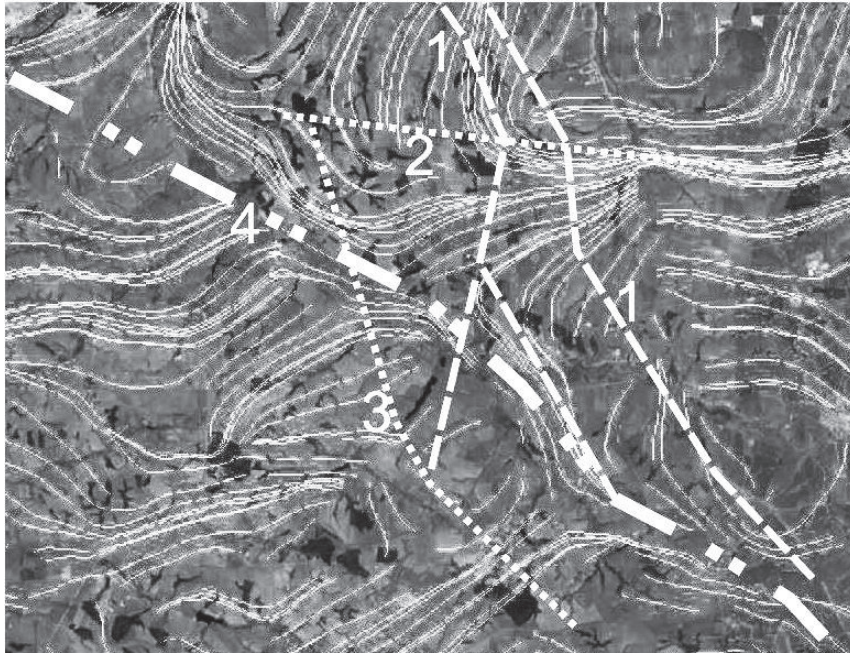


Рис. 4. Выраженность основных зон разломов: Железногорского (1), Субширотного (2) и Безымянного (3), а также мезозойской флексуры (4) в линеamentных формах

и северо-запада. Она делит район на два структурных блока. На северо-востоке находится Щигровский свод, на юго-западе – склон ДДА. Рисунок линеamentных форм в этих блоках различен. На северо-восток от флексуры линеamentные формы имеют замкнутый кольцевой характер, что соответствует глубинному плану свода. Разделяющий этот блок Субширотный разлом выражен в линеamentных формах, которые маркируют зону его динамического влияния. К юго-западу от флексуры линеamentные формы имеют запад-юго-запад-восток-юго-восточное и субширотное простирание. Это направление ортогонально основным структурам ДДА. Ветви Железногорского разлома практически нигде не подтверждаются линеamentными формами за исключением небольшого участка, где фрагмент Железногорского разлома совпадает с флексурой мезозойского осадочного чехла. Поэтому мы считаем, что и на рис. 4 выражена именно она, а не совпадающий с ней на небольшом участке фрагмент Железногорского разлома.

Как давно показано В.И. Макаровым [Макаров, 1997], в пределах платформенных областей разрывные дислокации (с заметными смещениями слоев, которые можно измерить) имеют подчинённое значение и сводятся преимущественно к трещинному крипу. Регион расположения Курской АЭС в течение всего позднего кайнозоя оставался платформенным регионом с крайне незначительными амплитудами (первые десятки метров) вертикальных движений [Иванченко, Малкин 2017], установленных стратиграфическим методом. Даже крупнейшие докембрийские разломы кристаллического основания в чехле не проявлены как разломы или проявлены в нём в качестве очень пологих флексур, то есть весьма малоградиентных как в пространстве, так и во времени изгибных дислокаций чехла. Полученная в результате компьютерного дешифрирования конфигурация линеamentных форм

(рис. 4) подтверждает выраженность упомянутой выше флексуры, по сути главной мезозойской пликативной структуры региона, в современном поле линеаментов и их статистических характеристик. На основе анализа линеаментных форм и их связи с геофизически установленными разрывными нарушениями можно сказать, что лишь фрагмент Субширотного разлома к востоку от его пересечения с Железнодорожным разломом хорошо выражен в линеаментных формах и, возможно, обладает некоторой современной активностью. Этот вывод совпадает с результатами полевых инженерно-геологических наблюдений.

Заключение

В результате исследования методами компьютерного линеаментного анализа достоверно не установлено признаков современной активности разломов вблизи площадки Курской АЭС за незначительным исключением восточного фрагмента Субширотного разлома и, таким образом, косвенно подтверждена высокая тектоническая стабильность территории вокруг (< 50 км) АЭС. В современных линеаментных формах лучше всего выражены слабые пликативные деформации пост-туронского времени, что, вероятно, свидетельствует об их длительном развитии.

В отличие от визуального дешифрирования метод компьютерного дешифрирования (LESSA) позволяет анализировать геодинамическую обстановку, благодаря повторяемости результатов и использованию наиболее устойчивых характеристик угловой статистики на базе большой выборки автоматически выделенных малых фотолинеаментов. Применение статистически достоверных параметров позволяет ослабить влияние шумов, связанных с линейными элементами изображения техногенной природы. Из природных факторов, определяющих линеаменты, отметим рельеф, прежде всего эрозионную сеть, что объясняет хорошее совпадение результатов линеаментного анализа космоснимков и цифровых моделей рельефа [Соколов, 2013; Флоринский, 2010]. Подтверждена тектоническая стабильность территории, прилегающей к АЭС, и Курского мегаблока в целом. Результат получен методами компьютерного линеаментного анализа космоснимков в двух масштабах и находится в соответствии с большинством оценок в ранее проведенных работах.

Работа выполнена в рамках Гос.задания ИДГ РАН (проект № АААА-А17-117112350022-3).

Литература

Друцкой С.В., Кононов Н.Д. Объяснительная записка к геологическим картам четвертичных и дочетвертичных отложений Курской обл. М. 1:500000. МПР РФ, М. : 2001.

Иванченко Г.Н., Горбунова Э.М. Использование данных дистанционного зондирования участков земной коры для анализа геодинамической обстановки. М.: ГЕОС, 2015, 111 с.

Иванченко Г. Н, Малкин Б.В. Оценка неотектонических деформаций в районе Курской АЭС // Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. Вып.9. М. : ГЕОС, 2017. С. 32–41.

Макаров В.И. Некоторые проблемы изучения новейшей тектоники платформенных территорий (на примере Русской плиты) // Разведка и охрана недр, 1997, № 1. С. 20–26.

Макеев В.М. Структурно-геодинамические условия устойчивости особо опасных и технически сложных объектов на древних платформах : диссертация доктора геолого-минералогических наук. Ин-т геоэкологии РАН. Москва, 2014. – 415 с.

Полетаев А.И., Тевелев А.В., Брянцева Г.В., Блюмкина Н.В. Изучение разрывно-линеamentной структуры района расположения Курской АЭС. II-я очередь, реконструкция / Отчет по договору № 271 с МО БГНИИКИИ «Атомэнергопроект». – М.: МГУ, 1992. Ч. I. – 204 с.; Ч. II. – 120 с.

Соколов С.А. Структурно-геоморфологическое строение и неотектоническое районирование территории Воронежского кристаллического массива: автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата геол.-мин. наук, Москва. 2013, – 24 с.

Флоринский И.В. Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Пущино 2010, – 267 с.

Zlatopolsky A «Program LESSA (Lineament extraction and stripe statistical analysis) Automated linear image features analysis – experimental results», Computers and Geosciences, vol. 18, no. 9, 1992. С. 1121–1126.

УДК 53.082.2+532.546+551.491.5

ДИНАМИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Э.М. Горбунова, А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов

ИДГ РАН

Реакция подземных вод на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений рассматривается в качестве основного индикатора, соответствующего динамике деформирования флюидонасыщенного коллектора. По данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод в напорном водоносном горизонте за период наблюдений 2008–2017 гг. выделены гидрогеологические отклики от 11 землетрясений с магнитудами 7.1–9.1, в безнапорном водоносном горизонте на протяжении 2013–2017 гг. – от 36 землетрясений с магнитудами 6.2–8.2. Сравнительный анализ зарегистрированных вариаций уровня в высокочастотной и низкочастотной областях позволил установить 3 типа гидрогеологических эффектов. Первые два типа, которые определены в ограниченном и широком диапазонах частот, соответствуют косейсмическим вариациям уровня, синхронным смещению грунта от землетрясений. Третий тип – постсейсмические необратимые изменения уровня подземных вод могут быть связаны с нарушением структуры порово-трещинного пространства.

DOI