

УДК 550.34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗЛОМОВ В ПЛАТФОРМЕННЫХ РАЙОНАХ (НА ПРИМЕРЕ РОСЛАВЛЬСКОГО РАЗЛОМА)

© 2015 г. В.Т. Левшенко, А.Г. Григорян

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Поиск глубинных разломов, перекрытых осадочным чехлом, и определение их сейсмической активности – актуальная задача при оценке сейсмических воздействий на важные гражданские и промышленные объекты (атомные электростанции, химические производства и др.). Одним из способов решения этой задачи является комплексное использование двух независимых методов – микросейсмического мониторинга и эманационно-радоновой съемки. Достоинствами рассматриваемого в статье комплекса исследований являются его высокая производительность, простота, относительная дешевизна по сравнению с другими методами.

В работе приводятся результаты совместной обработки данных, полученных названными методами, для определения сейсмической опасности особо важных объектов, расположенных вблизи Рославльского разлома в Смоленской области. Точное местоположение разлома до проведения представляемых исследований установлено не было. Это затрудняло оценку величины возможного сейсмического воздействия на объекты критической инфраструктуры, включая Смоленскую АЭС, и существенно снижало точность определения величины проектного и максимального расчетного землетрясений.

Ключевые слова: мониторинг, микросейсмическое поле, критическая инфраструктура, эманация радона, микротрещины, диффузия радона, сейсмические колебания, α -распад, волны Рэлея.

Введение

Поиск и определение положения глубинных сейсмогенерирующих разломов, перекрытых осадочным чехлом, – актуальная задача, которую необходимо решать при оценке возможных сейсмических воздействий на особо важные гражданские и промышленные объекты (атомные электростанции, химические производства и др.). Одним из способов решения этой задачи может быть совместное проведение микросейсмических и радоновых наблюдений в исследуемом районе. В работе приводятся результаты комплексной обработки данных названных методов применительно к определению сейсмической опасности объектов, расположенных вблизи Рославльского разлома в Смоленской области, точное местоположение которого до проведения представляемых работ установлено не было.

Рославльский разлом, являющийся зоной возможных очагов землетрясений, расположен вблизи промплощадки Смоленской АЭС – расстояние от разлома до АЭС, по данным ряда исследователей (см., например, [Айзберг, Гарецкий, 1974]), составляет от 2 до 14 км. То, что, как отмечено выше, точное местоположение разлома не было установлено, создавало трудности при оценке величины возможного сейсмического воздействия на расположенные поблизости важные объекты, поскольку в расчет сейсмической опасности закладываются магнитуда наиболее сильного в регионе землетрясения и минимальное расстояние до зоны возможного очага землетрясения,

обычно приуроченной к разломам. То же обстоятельство существенно снижало точность определения величины проектного и максимального расчетных землетрясений.

Физические предпосылки для постановки радоновых и микросейсмических исследований. Методика работ

Методика радоновых исследований зон разломов основана на выявлении аномалий эманаии подпочвенного радона, обусловленных геодинамическими процессами в верхней части земной коры.

Горные породы представляют собой трещиновато-пористые среды, общая пористость которых увеличивается в процессе механического выветривания. Из микротрещин и субкапиллярных пор, возникших при образовании горных пород, образуются более крупные трещины и поры (с эффективным диаметром 0.2–100 мкм). Основным наполнителем трещин в выветренных породах являются вода и воздух. За счет α -распада материнского изотопа (радия-226) атомы радона приобретают значительную энергию. Причиной диффузии радона в порах и трещинах является вызванное процессами химического выветривания неравномерное распределение радия-226 в коре выветривания горных пород, [Войтов, 1998]. Известно, что даже относительно слабые воздействия на среду энергией от источников сейсмических колебаний приводят к усилению выноса радона в область его стока – в приземную атмосферу [Николаев и др., 1994].

Тектонические процессы изменяют пористость и проницаемость горных пород, а также режим выделения радона, вызывая временные вариации концентрации подпочвенного радона в коре выветривания на контакте подвижных тектонических блоков земной коры.

Специфические особенности радона делают его оптимальным индикатором при изучении различных геологических и геохимических процессов. Исследования в геодинамически активных областях показывают, что сейсмические процессы оказывают сильное воздействие на радоновое поле. Усиление деформаций горных пород в периоды роста геодинамической активности сопровождается общим повышением плотности потоков газов-носителей радона и выходом последнего в подпочвенную и приземную атмосферы [Войтов, 1998].

Таким образом, всё вышесказанное позволяет считать применение метода газово-эманационной съемки для выявления тектонические нарушения при наличии осадочно-го чехла вполне обоснованным физически и геохимически.

Второй из используемых авторами методов – метод микросейсмических исследований – разработан в ИФЗ РАН А.В. Горбатиковым [Горбатилов, Степанова, 2008] и основан на использовании в качестве зондирующей волны микросейсм, представленных поверхностными волнами. Метод базируется на анализе пространственного распределения амплитуд вертикальной составляющей микросейсмического поля для всех частот спектра в допущении, что вертикальная компонента поля для частот в диапазоне 0.02–1.0 Гц в основном определяется вкладом фундаментальной моды волн рэлеевского типа.

Известно, что волна Рэлея является поверхностной, распространяющейся вдоль свободной границы твердого тела. Упругие возмущения и энергия таких волн локализованы в тонком приповерхностном слое, сравнимом по толщине с длиной волны. Амплитуда колебаний точек поверхности в случае плоской рэлеевской волны, распространяющейся по границе однородной среды без затухания, одинакова во всех точках поверхности. В случае неоднородной среды поле амплитуд может иметь сложную структуру. Рэлеевские волны различной частоты имеют разную глубину проникновения,

в связи с чем их взаимодействие с заглуженной неоднородностью будет определяться соотношением между глубиной залегания неоднородности и длиной облучающей волны. В результате взаимодействия широкополосного пакета волн Рэлея с заглуженными неоднородностями спектр сигнала, регистрируемого на поверхности, различен в разных точках.

В работах [Капустян, Левшенко, Юнга, 2002; Капустян и др., 2004] изучается влияние свойств компактных заглуженных неоднородностей на спектр вертикальных колебаний точек поверхности. Был проведен ряд компьютерных экспериментов по исследованию взаимодействия фундаментальной моды волны Рэлея с заглуженными неоднородностями. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными. Проведенное авторами данной работы численное моделирование методом конечных элементов показало, что при распространении поверхностных волн Рэлея они реагируют на заглуженную и локальную по вертикали и горизонтали неоднородность. Установлено, что при достаточном вертикальном размере неоднородности, она начинает заметно искажать поле амплитуд волн, распространяющихся на поверхности, если верхний край неоднородности находится на глубине, равной приблизительно половине длины этой волны. При определенных условиях удается локализовать компактную неоднородность и оценить ее упругие свойства.

Исследования показали, что под влиянием локальных приповерхностных и глубинных геологических структур микросейсмическое поле в частотном диапазоне 0.03–1.0 Гц испытывает искажения, которые сводятся к тому, что амплитуды микросейсм уменьшаются над высокоскоростными и увеличиваются над низкоскоростными неоднородностями. С учетом представлений о составе микросейсмического поля и суперпозиции цугов фундаментальных мод Рэлея с различным частотным заполнением выведена связь между глубиной залегания неоднородности и спектральной частотой микросейсмического сигнала, на которой происходит максимальное искажение, – $H=0.5\lambda$, где H – глубина залегания неоднородности; $\lambda=VR(f)/f$ – длина фундаментальной моды волны Рэлея ($VR(f)$ – фазовая скорость волн Рэлея; f – частота колебаний).

Показана на численных моделях и подтверждена на практике возможность картирования геологических объектов путем реализации измерительного алгоритма, включающего в себя последовательное измерение спектров микросейсм в точках сети перемещаемыми приборами и статистическое накапливание отношений амплитудных спектров мощности.

Нами проведена модернизация данной методики и детально изучено формирование аномалий микросейсмического поля над заглуженным разломом, что позволило с достаточной точностью провести полевые работы по определению местоположения Рославльского разлома.

Аппаратурное обеспечение исследований

Технологический процесс при шпуровой эманационной съемке включает несколько операций. Сначала с помощью механизированных средств проходки готовится шпур глубиной ~1 м. Затем в этот шпур помещается пробоотборник, с помощью которого в камеру эманометра забирается подпочвенный воздух. Концентрация радона в пробе воздуха определяется по величине сцинтилляционного или ионизационного эффекта, создаваемого α -излучением радона, торона и других продуктов распада.

Использованная нами специализированная радоновая станция СРС-01 предназначена для работы в автономном режиме, снабжена управляющим цифровым процессором и дополнительными устройствами, позволяющими одновременно с измерениями

концентрации радона в почве регистрировать барическое давление, температуру воздуха, влажность и концентрацию торона. Учет этих параметров при расчете реальной концентрации радона позволяет внести корректирующие поправки и существенно повысить точность измерений. Диапазон измерения – от 20 до $5.0 \cdot 10^4$ Бк·м⁻³; пределы допускаемой основной относительной погрешности не превышают $\pm 30\%$ при доверительной вероятности 0.95.

При мониторинге станция может работать в автоматическом режиме без дополнительного обслуживания в течение полутора месяцев, выполняя до 64 измерений в сутки. В режиме профильных наблюдений с помощью станции осуществляется несколько измерений в одной точке, что позволяет повысить точность определения концентрации радона. Станция СРС-01 – полностью автоматизированный прибор, временной режим работы которого составляет 2 мин для отбора пробы воздуха и 20 мин для измерения. При каждом измерении фиксируется дата, время, температура, атмосферное давление, относительная влажность, концентрация радона и торона, а также напряжение питания и параметр контроля состояния станции.

Для просмотра данных предусмотрена программа Trb.Viewer.exe; накопленные энергетические спектры могут быть просмотрены с помощью программы RRASM.exe. Обе названные программы поставляются в комплектации станции НТТМ-ЗАЩИТА.

Для регистрации микросейсмических сигналов в широком частотном диапазоне использовались шесть автономных цифровых сейсмических станций третьего поколения СЦСС-3-TVCH, оснащенных сейсмометрами КМV. Номинальная чувствительность прибора – 1800 В/м/с; частотный диапазон – 0.5–70 Гц. Каждая станция была также снабжена 12-канальным приемником GPS, позволяющим определять координаты пункта установки и время. Станция может работать с источником питания 12 В в диапазоне температур –30...+50 °С при потреблении энергии не более 430 мВт. За один сеанс регистрации может быть записано до 1000 четырехканальных файлов длительностью 60 мин, т.е. автономность станции составляет больше месяца. Станция оснащена дополнительным вторичным источником точного времени от термостатированного генератора, который используется при работе в штольнях, подвалах и в местах, где сигнал GPS не принимается. Для контроля качества записей станция снабжена системой калибровки регистрируемых сигналов.

Полевые работы, обработка данных.

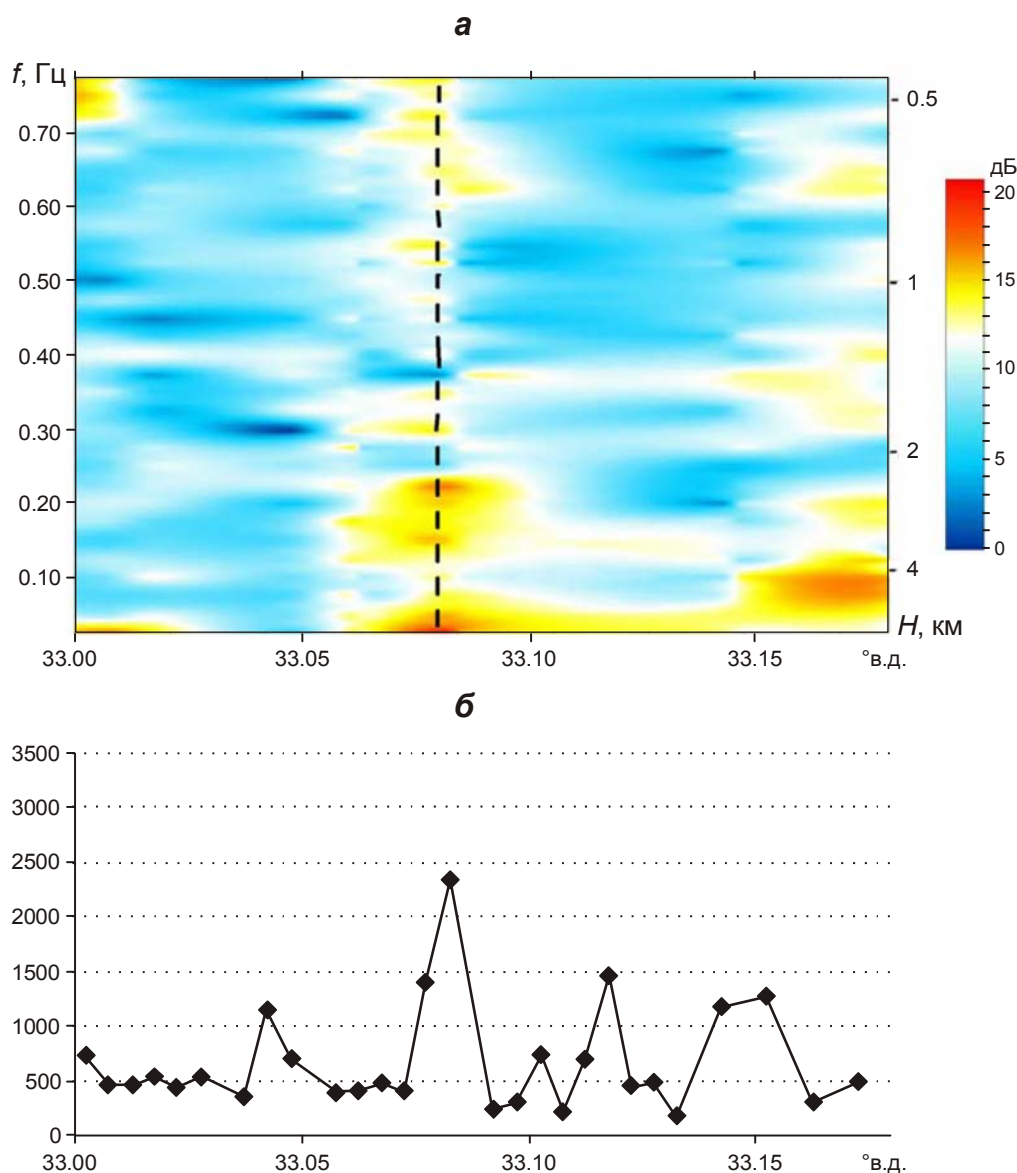
Результаты микросейсмических и радоновых исследований

В 2009 г. нами были выполнены полевые работы с использованием комплекса представленных выше независимых методов, целью которых было уточнение положения Рославльского разлома, расположенного вблизи такого особо важного объекта, как Смоленская АЭС. Поскольку район исследований отличается значительной залесенностью и заболоченностью при отсутствии необходимого количеством переправ через многочисленные реки, отработанный профиль оказался единственно возможным для проведения такого рода исследований. Общая длина профиля составила 14.6 км; он проходил вкрест простирающейся 12-километровой зоны, в которой, по некоторым данным [Айзберг, Гарецкий, 1974], должен находиться разлом. Положение разлома было определено путем экстраполяции данных профильных наблюдений.

В ходе наблюдений измерительные пункты располагались по линии профиля с шагом 100 м; запись на каждом пункте велась в течение не менее 6 ч.

Обработка полученных сейсмических данных проводилась с помощью специально разработанного программного комплекса; было обработано более 7000 файлов

трехкомпонентных цифровых записей. В результате обработки полевых данных и расчета спектральных характеристик сигналов был получен детальный глубинный разрез предполагаемой зоны разлома (рисунок *a*). Наиболее контрастные аномалии в спектрах микросейсм уточняют положение разломной зоны, позволяя в дальнейшем более достоверно определить величину возможного сейсмического воздействия на особо ответственный объект. Последнее связано с тем, что в расчет сейсмической опасности закладываются магнитуда наиболее сильного в данном регионе события и минимальное расстояние до зоны возможного очага землетрясения. Краевая аномалия спектра не является достаточно полной и контрастной и не может однозначно связываться с зоной разлома.



Профильные наблюдения в зоне Рославльского разлома, 2009 г. Разрез, построенный по результатам микросейсмического зондирования (*a*) и данные радоновой съемки (*b*). На горизонтальных осях координаты точек наблюдения; на вертикальных – частоты колебаний сейсмических волн (*a*, левая ось), глубины заложения разлома (*a*, правая ось) и концентрация радона, Бк/м³ (*b*). Цветовая шкала на *a* – интенсивность спектра; штриховая линия на разрезе – положение Рославльского разлома

Одновременно вдоль того же профиля были проведены независимые работы по измерению концентрации радона, дополнившие сейсмические данные, используемые для определения местоположения Рославльского разлома; результаты полевых наблюдений представлены на рисунке (б).

Обработка данных радоновой съемки показала аномальное повышение концентрации радона в той же части профиля, где были прослежены наиболее контрастные аномалии в спектрах микросейсмического волнового поля. Таким образом, можно считать, что максимальная аномалия радонового поля на линии профиля соответствует местоположению заглабленного Рославльского разлома.

Установив положение Рославльского разлома по результатам двух независимых методов, можно однозначно определить кратчайшее расстояние от разлома до Смоленской АЭС – оно составляет, по нашим данным, 9 км. Такое уточнение позволяет переоценить ранее сделанные оценки возможных сейсмических воздействий на объект.

Эффективность использованной методики была подтверждена при работах 2010 г. в Воронежской области на Платовско-Варваринском разломе, положение которого было известно по ряду прямых геолого-структурных и геологических исследований [Аронский, Гинтов, Кендзера, 2001]. И в этом случае местоположение аномалий микросейсмического и радонового полей соответствовало положению разлома.

Соответствие спектральных полос реальным глубинам Рославльского разлома достигается в формуле пересчета $H=0.5\lambda$ при скорости рэлеевской волны $V_R \sim 1000$ м/с, что соответствует экспериментально измеренным скоростям пород нижнего венда и рифея [Горбатилов, Степанова, 2008]. Исследуемая глубина разломной зоны составляет 4–5 км; видимая ширина не превышает 0.5–0.7 км.

Исследуемый район является частью Восточно-Европейской платформы, для которой типичная глубина очага землетрясения составляет 5–10 км. Наклон графика повторяемости, основанный на имеющейся современной версии каталога землетрясений Восточно-Европейской платформы, может быть оценен как $b \approx 1$ [Чепкунас, 2003].

Переоценка возможных сейсмических воздействий выполнена с учетом затухания балльности по формуле Н.В. Шебалина [1968], подтвержденной в работе [Татевосян, 2004]. Интенсивность возможных сотрясений определяется как

$$I = 1.5M - 3.5 \lg R + 3.0,$$

где I – интенсивность сотрясения в баллах; M – магнитуда; R – расстояние от гипоцентра до объекта.

Таким образом, возможное сейсмическое воздействие на промплощадку Смоленской АЭС при уточненном положении Рославльского разлома составляет для проектных землетрясений – 4 балла, для максимальных расчетных – 5.

Выводы

Проведенные полевые исследования продемонстрировали эффективность комплексного использования микросейсмического мониторинга и эманационно-радоновой съемки для установления местоположения разломов. Совпадение результатов, полученных двумя независимыми методами, позволяет считать достоверным определение местоположения Рославльского разлома.

Разлом расположен на расстоянии 9 км от АЭС; глубина разломной зоны составляет 4–5 км; видимая ширина выявляемой зоны разлома не превышает 0.5–0.7 км.

Полученные результаты уточняют оценку возможного сейсмического воздействия на промплощадку Смоленской АЭС, согласно которой для проектных землетрясений она составляет 4 балла, для максимальных расчетных – 5 баллов.

Литература

- Аронский А.А., Гинтов О.Б., Кендзера А.В. Потенциальная активность разрывных структур и проблема сейсмической опасности в районах крупных промышленных объектов // Геофизический журнал. 2001. № 6. С.54–66.
- Айзберг Р.Е., Гарецкий Р.Г. Разломная тектоника Белоруссии и смежных регионов // Разломы Белоруссии и Прибалтики. Мн., 1974. С.7–24.
- Войтов Г.И. Мониторинг радона атмосферы подпочв сейсмически активной Средней Азии // Физика Земли. 1998. № 1. С.27–38.
- Горбатиков А.В., Степанова М.Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств, стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов // Физика Земли. 2008. № 1. С.57–67.
- Капустян Н.К., Левшенко В.Т., Юнга С.Л. Экспериментальные исследования сейсмичности платформ: проблемы и пути решения // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения. Т. 2. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2002. С.32–37.
- Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н., Шахова Е.В., Антоновская Г.Н. Выявление разрывных нарушений путем анализа эндогенного сейсмического излучения // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Т. 1. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. С.369–372.
- Николаев А.В., Рудаков В.П., Войтов Г.И., Уточкин Ю.А., Чайка В.П. О радоновом поле органического слоя нефтегазоносных структур (на примере Осташковичского нефтяного месторождения, Белоруссия) // Докл. РАН. 1994. Т. 336, № 4. С.529–532.
- Татевосян Р.Э. Макросейсмические аспекты сейсмической опасности: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2004. 56 с.
- Чепкунас Л.С., Левшенко В.Т., Лопанчук А.А. Результаты анализа инструментальных данных для Тамбовского землетрясения 30 декабря 1954 г. // Физика Земли. 2003. № 4. С.56–67.
- Шебалин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С.95–111.

Сведения об авторах

ЛЕВШЕНКО Валерий Трифонович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1. Тел: 8(499) 254-91-15. E-mail: vera-shu2007@yandex.ru

ГРИГОРЯН Алина Гришаевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1. Тел: 8(499) 254-87-35. E-mail: ag-grig@ifz.ru

THE DETERMINATION OF FAULTS POSITION IN CRYSTAL PLATFORM REGIONS USING DATA OF COMPLEX INVESTIGATIONS (EXAMPLE OF THE ROSLAVLSKY FAULT)

V.T. Levshenko, A.G. Grigorian

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Investigation of deep faults overlain by sedimentary cover is currently an important and essential problem in seismic hazard assessment of critical facilities (nuclear, chemical, etc.). As a way to solve it we propose the complex application of two independent methods: radon emanation survey and microseismic monitoring. This complex is highly effective, simple, and relatively cheap as compared with other methods. This paper presents the results of complex data processing of radon survey and microseismic monitoring of the objects located near the Roslavlsky fault (Smolensk region). The exact location of the fault has not been found before the present study. Therefore it complicated the hazard assessment of critical facilities including the Smolensk NPP and significantly decreased the accuracy of determination of the Operating Basis Earthquake (OBE) and Safe Shutdown Earthquake (SSE).

Keywords: monitoring, microseismic field, critical facility, radon emanation, microcrack, radon diffusion, seismic signals, alfa-decomposition, Rayleigh waves.