



УДК 550.834 550.42

П. П. Фирстов¹, Р. Р. Акбашев¹, Е. О. Макаров¹, Р. И. Паровик²

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: firstov@emsd.ru

² Институт космофизических исследований и распространения ДВО РАН

Строение верхней части геологических разрезов в пунктах мониторинга почвенного радона на Петропавловск — Камчатском геодинамическом полигоне

В работе приведены результаты изучения строения верхней части геологического разреза в трёх пунктах регистрации почвенного радона (^{222}Rn) на Камчатском геодинамическом полигоне. С целью определения физико-механических свойств верхней толщи осадочных пород, выделения разуплотненных зон и выявления зоны полного влагонасыщения выполнен сейсморазведочный профиль методом переломлённых волн и построены георадиолокационные профили. Детальное изучение верхней части геологического разреза даст возможность детализировать физические процессы миграции радона для построения моделей миграции в системе «грунт – атмосфера» в пунктах регистрации почвенного радона.

Введение

Процессы дегазации Земли протекают неравномерно как в пространстве, так и во времени и в значительной степени контролируются распределением и величиной напряжений в разломах земной коры различной иерархии. Миграция газов в верхней толще земной коры определяется их диффузионными возможностями и фильтрационными свойствами горных пород (проницаемость, пористость, трещиноватость). В свою очередь, фильтрационные свойства структурных блоков земной коры зависят от действующего поля напряжений, и любые изменения напряженно — деформированного состояния должны находить отражение в динамике почвенного газа.

Наиболее технологичным методом в геохимических исследованиях с целью прогноза землетрясений является регистрация радона (^{222}Rn) в почвенном воздухе и растворённого в подземных водах. Он основан на теории массопереноса радона и эманационном методе картирования с целью поиска месторождений радиоактивных руд. Начиная с 70-х гг. XX в., радоновый метод стал активно использоваться во всех сейсмоактивных регионах мира. После некоторого спада интереса, с середины 80-х гг. наблюдается всплеск работ, связанных с изучением сейсмоеманационных эффектов в сейсмоактивных районах мира [5, 6, 13–15].

Согласно классическому представлению, сложившемуся в теории эманационного метода и его экспериментальному подтверждению, можно выделить четыре основных этапа переноса Rn в системе «грунт – атмосфера» [5]:

– на первом этапе происходит выделение (эманирование) Rn из кристаллической решётки минералов в мелкие поры грунта, долю высвобождающегося Rn характеризует коэффициент эманирования;

– на втором этапе процесса происходит чисто молекулярное диффузионное распространение Rn в мелких порах грунта до тех пор, пока он не попадёт в более крупные поры, в которых уже может иметь место конвекция;

– на третьем этапе процесса радонвыделения имеет место диффузионно-конвективный его перенос по крупным порам и трещинам в грунте, а затем сток в атмосферу;

– в приземном слое атмосферы роль молекулярной диффузии падает, но возрастает роль турбулентной диффузии, обусловленная градиентом температуры приземной атмосферы, а также скоростью и направлением ветра.

Схематически этапы процесса миграции Rn показаны (рис. 1), где также отражено, что перенос Rn в системе «грунт – атмосфера» в зоне аэрации осуществляется с помощью двух основных процессов — молекулярной диффузии и адвекции. Первый процесс распространения в поровом пространстве грунта молекул газа, уравнивает концентрацию Rn во всех частях объёма породы. Второй процесс характеризуется вертикальным перемещением молекул газа по порам в результате теплообмена (конвекции), вариаций давления (фильтрации), а также всплытия микропузырей в зоне полного влагонасыщения. Отсюда видно, что на процесс миграции Rn в рыхлых отложениях сильно влияет проницаемость грунта, зависящая от его свойств и строения, наличия водоносных горизонтов и изменений напряженно-деформированного состояния геосреды.

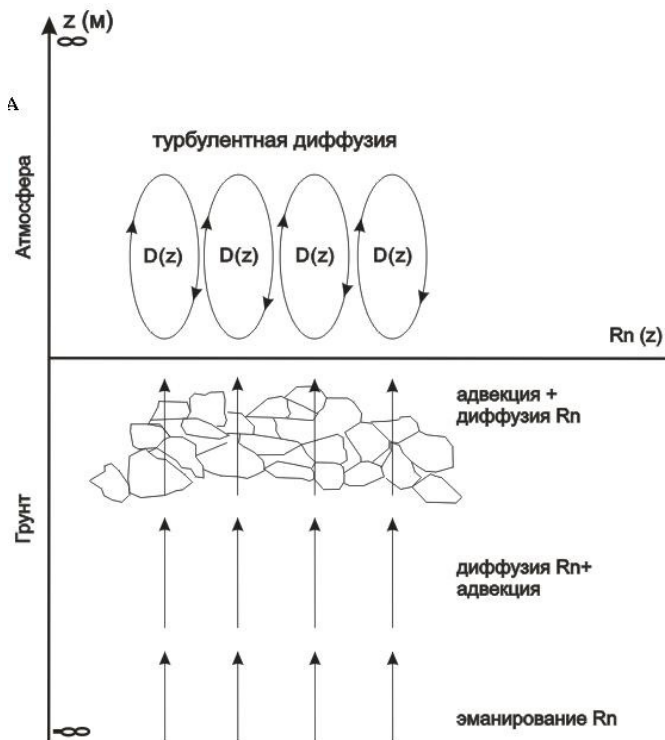


Рис. 1. Обобщённая схема переноса радона в системе «грунт-атмосфера» с помощью механизмов диффузии, адвекции и турбулентной диффузии.

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне начиная с 1998 г. работает сеть пунктов регистрации ОА Rn в почвенном воздухе рыхлых отложений. В работах [2, 8] показано, что перед 60% землетрясений с магнитудой $M > 5,5$, происходящими в Авачинском заливе, в поле почвенного Rn наблюдались бухтообразные предвестники со временем упреждения 1–8 суток. Пункты сети радонового мониторинга расположены в разных структурных элементах побережья Авачинского залива, что даёт основание предполагать различный отклик в динамике ОА Rn в связи с разной реакцией отдельных блоков района на геодинамические процессы, связанные с подготовкой сильных землетрясений (рис. 2).

Кроме того, каждый пункт имеет свои особенности строения элювиально-делювиальных отложений, в зоне аэрации которых, как правило, размещены газоразрядные счётчики — датчики β -излучения Rn и его короткоживущих радионуклидов. В данной работе проведено изучение строения верхней части геологического разреза в пунктах радонового мониторинга, расположенных в зоне Паратунского грабена (рис. 2).

Описание пунктов сети

Опорный пункт ПРТ. располагается на речной террасе ручья Коркина, который трассирует субширотный разлом в пределах Паратунского грабена. К Паратунскому грабену приурочена одноимённая

геотермальная система. На расстоянии около 700 м от пункта ПРТ ниже по течению ручья находятся естественные выходы термальных вод с содержанием растворённого Rn до $1,5 \text{ кБк/м}^3$.

В ПРТ регистрация концентрации Rn проводится в точках (рис. 3):

- ПРТ_1 — подсобное помещение, врезанное в склон, где ведётся регистрация Rn в аллювиальных отложениях в зоне аэрации на глубине один метр от дна помещения (точка 1) и в воздухе. Регистрация ведётся с помощью двухканального радиометра РЕВАР;

- ПРТ_2 — подвал под домом, глубиной 1,7 метра, где ведётся регистрация Rn на глубине около трёх метров от поверхности в зоне полного насыщения с помощью радиометра РЕВАР (точка 2), а также регистрируются атмосферное давление и температура воздуха на улице с помощью регистратора REGIN;

- ПРТ_3 — в подвальном помещении на глубине 1,7 м расположен аппаратный комплекс для регистрации концентрации почвенных газов (РКПГ) на базе прибора ALMEMO 2390–8 [2]. В этой точке одновременно со счётом импульсов с двух газоразрядных счётчиков регистрируется концентрация углекислого газа (CO_2), молекулярного водорода (H_2), а также с помощью радиометра СПР-68–01, γ -излучение на глубине $\sim 1,5$ м от поверхности пола помещения.

Пункт ПРТ2. расположен на базе геотермального стационара Института Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН. В пункте установлен автоматизированный комплекс регистрации концентрации почвенных газов, а регистрация концентрации Rn осуществляется на двух глубинах зоны аэрации [2]. Кроме того, на высотах 2,5 и 5 м осуществляется регистрация β и γ — излучений. Особенностью пункта является возможность беспроводного управления РКПГ и удалённого съёма данных по каналам сети GSM.

Пункт КРМ. расположен в пойме реки Карымшина притока реки Паратунка. Датчики Rn располагаются в шпурах элювиально-делювиальных отложений на двух глубинах зоны аэрации (один и 1,3 м). Так же в этом пункте регистрируются напряжённость атмосферного электрического поля Земли. Регистрация ведётся с помощью прибора ALMEMO с частотой 6 цикл/час.

С целью оценки достоверности аномалий, регистрация Rn последних двух пунктов осуществляется на разных глубинах зоны аэрации. Такое расположение датчиков позволяет рассчитывать ещё один параметр — плотность потока Rn с поверхности (ППР). Многие исследователи указывают на большую чувствительность ППР по сравнению ОА Rn к изменениям напряженно-деформированного состояния блока геосреды района пункта регистрации [11, 12].

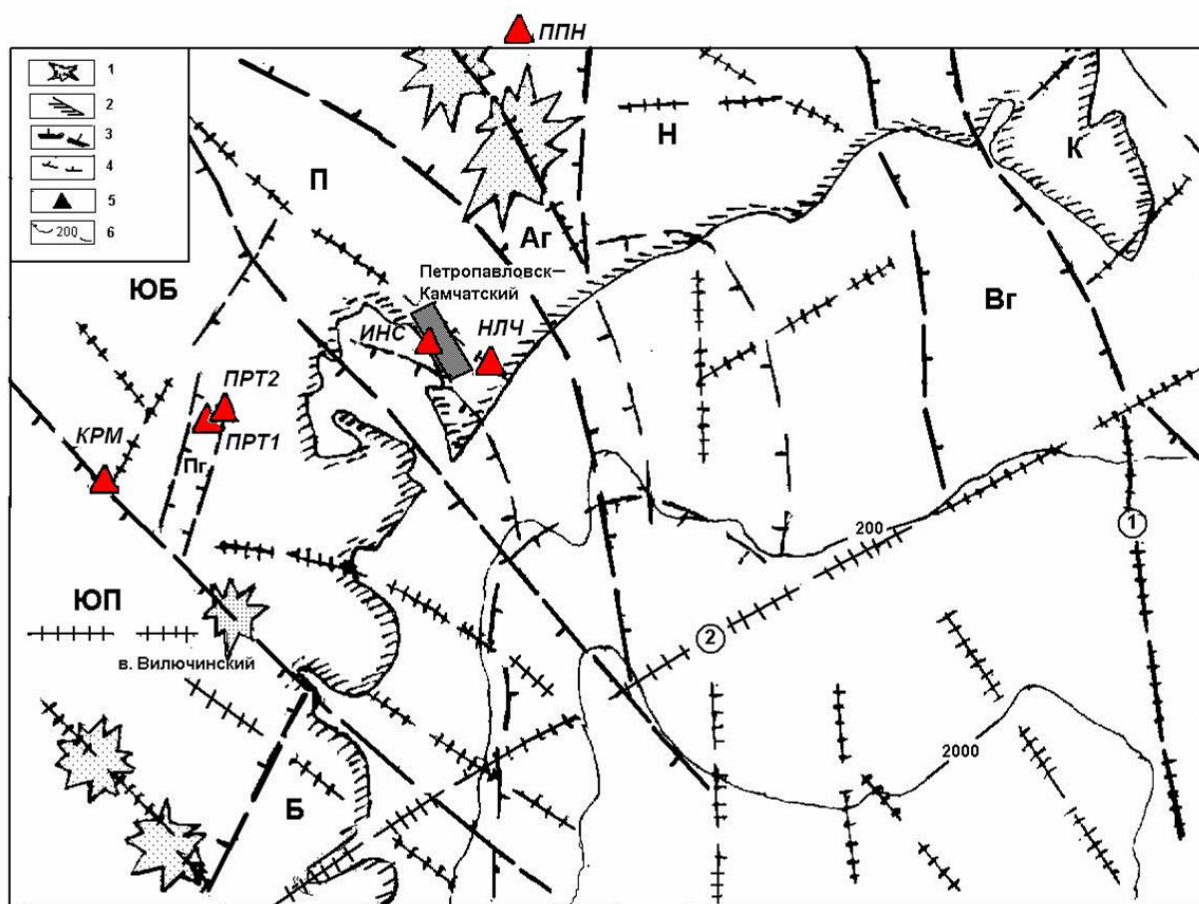


Рис. 2. Тектоническая схема акватории Авачинского залива и расположение пунктов регистрации почвенного радона: 1 – четвертичные вулканы; 2 – береговая линия; 3 – наиболее крупные разломы со значительными вертикальными смещениями (границы структур); 4 – разломы второго порядка (бергштрихи указывают на опущенный блок); 5 – пункты сети мониторинга почвенного Rn; 6 – изобаты. Геолого-тектонические структуры: Н – Налычевское поднятие; К – Калатырский горст; П – Петропавловский горст; Б – Береговой горст; Аг – Авачинский грабен; Пг – Паратунский грабен; Вг – Вахильский грабен, синклинали; ЮБ – Южно-Быстринский блок; ЮП – Южно-Камчатский прогиб. Цифры в кружках – разломы регионального порядка: 1 – Шипунский, 2 – Русский. Пункты регистрации Rn: ПРТ1 – опорный пункт, ручей Коркино; ПРТ2 – геотермальный стационар Института Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН, КРМ – долина реки Карымшина.

Аппаратура и методика работ

Аппаратура. Для исследования строения верхней части геологического разреза в районе пунктов радонового мониторинга использовались: цифровая инженерная сейсморазведочная станция «Лакколит X-М3», георадар «Око-2» в модификации АБДЛ «Тритон».

Блок «Лакколит X-М3» обеспечивает получение данных с 24-х сейсмических каналов и их предварительную обработку. Отображение результатов и дополнительная обработка данных в полевых условиях производится с помощью ноутбука с прикладным программным обеспечением.

Отличительными особенностями этой станции являются: скорость обмена данными до 100 Мбит/с; встроенный электронный коммутатор; регистрация и предварительная обработка данных, осуществляемая встроенными сигнальными процессорами, в реальном масштабе времени; повышенная надёж-

ность, благодаря увеличению степени интеграции (www.logsys.ru).

Георадар – мобильный и компактный современный геофизический прибор, позволяющий проводить обследования поверхностного слоя грунта с высокой детальностью на глубины от 0 до 25 м. Георадар представляет собой радиолокатор, направляющий зондирующие электромагнитные импульсы метрового и дециметрового диапазона в исследуемую среду (вода, грунт, стены зданий и т. д.). Электромагнитный импульс, отражаясь от границ слоёв с различными электрофизическими свойствами, даёт представление о границах исследуемого разреза. Такими границами могут быть уровень грунтовых вод и контакты: между сухими и влагонасыщенными грунтами, между породами различного литологического состава [1]. Для работы на объекте использовался георадар «Око 2» в модификации АБДЛ «Тритон» с неэкранированным антенным блоком,

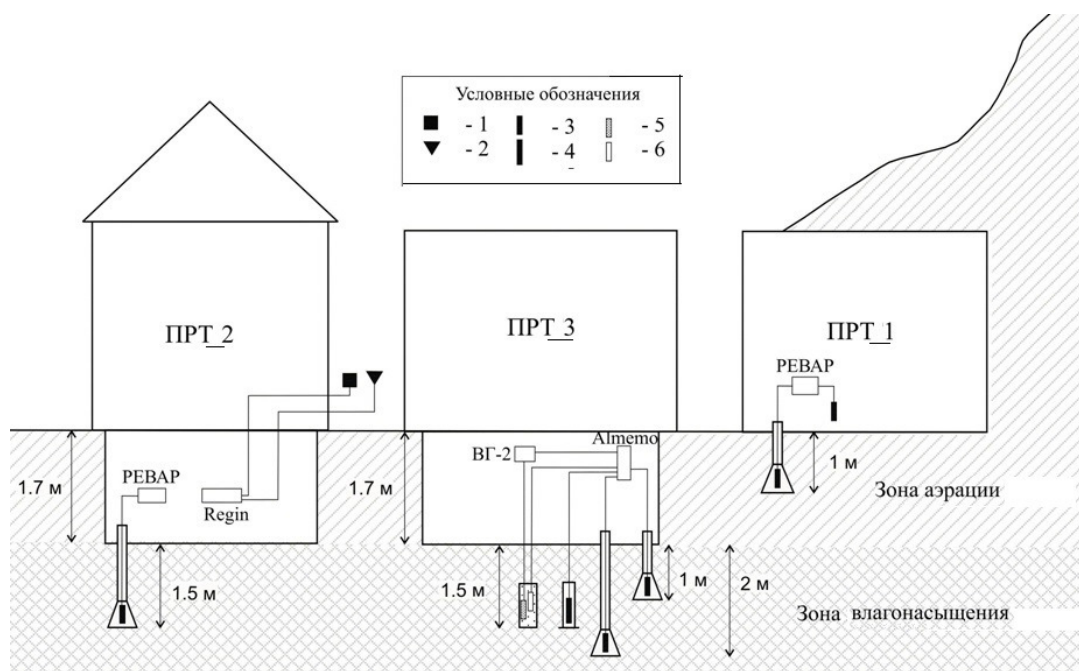


Рис. 3. Схема наблюдений за концентрацией почвенных газов на опорном пункте ПРТ: 1 — датчик давления; 2 — датчик температуры; 3 — газоразрядный счётчик СВМ-19; 4 — датчик гамма-излучения; 5 — датчик H₂; 6 — датчик CO₂

с частотой дипольных излучателей 50 и 100 МГц (www.logsys.ru).

Методика работ. Сейсморазведочные работы проводились в модификации сейсмозондирования методом преломлённых волн (МПВ), по системе точечного зондирования с получением пар встречных и расходящихся годографов. Так как работы проводились в осенний период, при отрицательных температурах воздуха, когда произошло промерзание поверхностного слоя земли, то это затруднило возбуждение и регистрацию поперечных волн. Поэтому разрезы по поперечным волнам не строились.

Длина расстановки сейсмического зонда составляла 46 м, при шаге между сейсмоприёмниками в 2,0 м. Источником сейсмического сигнала являлось ударное воздействие по металлической подставке кувалдой весом 8 кг.

Георадарные работы проводились по методике непрерывного профилирования со следующими параметрами: накоплений 30, глубинность — оптимальная, при влажных условиях профилирования. Данные параметры задавались в блоке обработки непосредственно перед выполнением георадиолокации.

Методика обработки данных. Скоростные разрезы сейсмозондирования методом МПВ строились с помощью прикладного пакета программ «RadExPro» (www.radexpro.ru) по общепринятой методике, способом пластовых скоростей. В результате интерпретации были получены значения скоростей распространения продольных волн (V_p) в отдельных слоях, выделены соответствующие им границы и определена их мощность Н (см. табли-

цу). Кроме того, по V_p была определена плотность скелета грунта по эмпирической формуле: $\gamma = 1,38 + 0,00033V_p$. Методика определения и применения данной зависимости подробно изложена в работе [7].

Предварительная интерпретация материалов радарной съёмки проводилась в программном комплексе «GeoScan32» (www.logsys.ru). Для интерпретации использовались стандартные процедуры: изменения коэффициента усиления, удаления тренда, а также спектрального анализа.

Строение верхней части геологического разреза

В трёх пунктах радонового мониторинга: ПРТ, ПРТ2, КРМ были выполнены сейсморазведочные и георадарные профили с целью исследования верхней части геологического разреза.

Опорный пункт радонового мониторинга ПРТ. В районе пункта было выполнено два сейсмических профиля (СП) и георадарный профиль (ГП) длиной 270 метров (рис. 4а).

Результаты работ. В ста метрах от расположения пункта ПРТ вверх по ручью был выполнен СП1 поперёк долины ручья Коркина с выходом на левый склон, а СП2 начинался на правом берегу ручья Коркина в долинной его части. Сейсмические разрезы полученные на этих профилях приведены (рис. 5а, б), а скорости сейсмических волн, мощности слоёв и плотности скелета грунта в таблице.

Для СП1 на первой границе скорости меняются равномерно без резких скачков. Верхний слой в долине имеет мощность 2,8 м, а вверх по склону мощность уменьшается до полутора метров. Верх-

Скорости сейсмических волн, мощности слоёв и плотности скелета грунта на сейсморазведочных профилях СП1 и СП2 в пункте ПРТ

| № границы | Скорость, м/с | | | | | Мощность слоя, м | | | | | Плотность скелета грунта, г/см ³ | | | | |
|------------------------|---------------|------|------|------|------|------------------|-----|-----|-----|-----|---|------|------|------|------|
| | 1к | 6к | 12к | 18к | 24к | 1к | 6к | 12к | 18к | 24к | 1к | 6к | 12к | 18к | 24к |
| Сейсмический профиль 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 659 | 719 | 691 | 640 | 628 | 2,8 | 2,1 | 1,0 | 1,3 | 1,3 | 1,59 | 1,61 | 1,6 | 1,59 | 1,58 |
| 2 | 1232 | 1193 | 1099 | 1144 | 1243 | 5 | 3,9 | 6 | 8,5 | 6,7 | 1,78 | 1,77 | 1,74 | 1,76 | 1,79 |
| Сейсмический профиль 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1000 | 998 | 985 | 1066 | 1000 | 1,2 | 1,7 | 2,2 | 2,5 | 2,1 | 1,71 | 1,70 | 1,70 | 1,73 | 1,71 |
| 2 | 2008 | 2038 | 2166 | 1771 | 1926 | 3,1 | 3,1 | 3,6 | 4,5 | 3,3 | 2,04 | 2,05 | 2,07 | 1,96 | 2,01 |

Примечание: Серым цветом выделены участки с пониженными скоростями и плотностью скелета грунта и соответствующие им мощности слоёв.

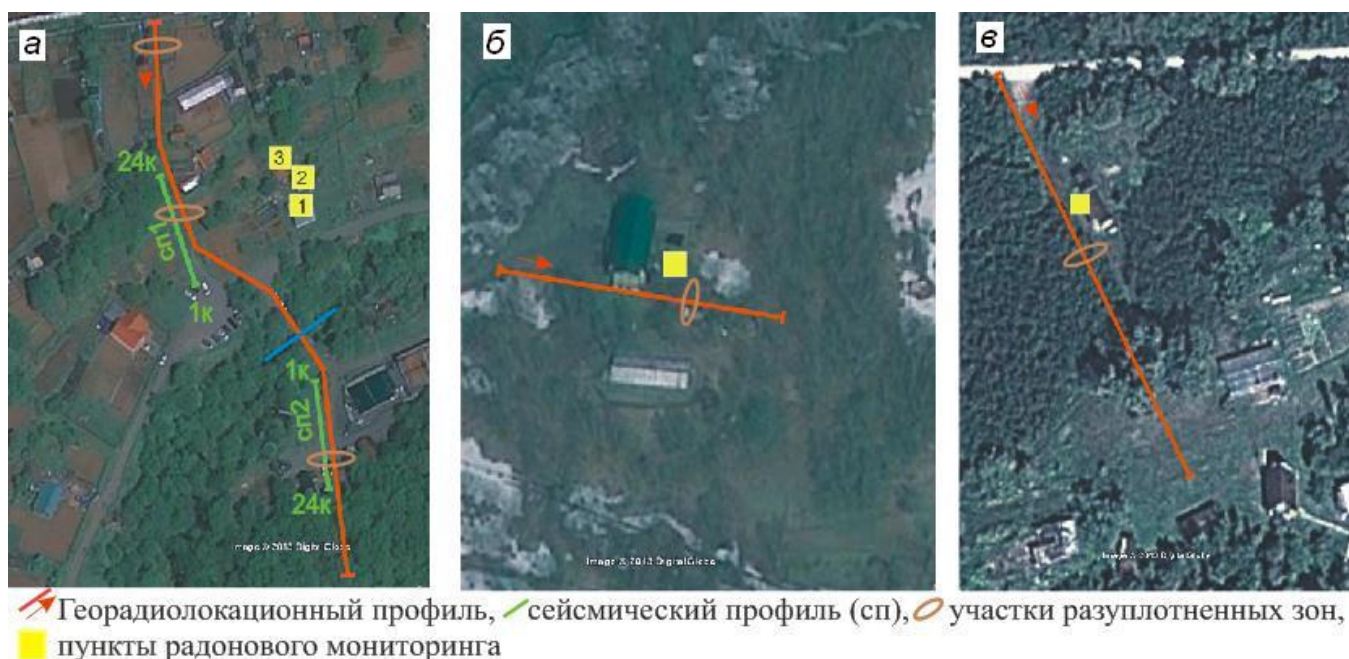


Рис. 4. Расположение сейсморазведочных и георадарного профилей – в районах пунктов: а – ПРТ, б – ПРТ2, в – КРМ.

ний слой однороден без признаков разуплотнения. По-видимому этот слой является почвенно-пирокластическим чехлом. Под ним лежит слой сложенный песчано-глинистым грунтом аллювиального происхождения с характерными скоростями продольных волн 600–700 м/с. Следующий слой представлен крупнообломочными материалами с песчаным заполнителем ледникового происхождения¹ с характерными скоростями продольных волн 1000–1200 м/с. По второй границе на 12–22 каналах сейсмического профиля выделяется зона с пониженными скоростями и с увеличенной мощностью слоя. Понижения скоростей, а так же, соответствующие им, увеличения мощности второго слоя связаны с разуплотнёнными зонами на данном участке профиля.

¹Отчёт «Очистные сооружения с. Паратунка». Фонды ООО «Изыскатель»

На СП2 видно такое же трёхслойное строение скоростного разреза с двумя скоростными границами. Скорость для первой границы меняется равномерно и явных резких изменений не наблюдаются. Почвенно-пирокластический чехол отсутствует в результате техногенных причин (автомобильная дорога). Слой представлен окатанным галечниковым грунтом аллювиального происхождения с крупно-песчаным заполнителем. По второй границе скорости распределены не равномерно, на 17–23 каналах выделяется зона с пониженными скоростями и с увеличенной мощностью слоя. Данное понижение скоростей, а так же, соответствующие им, понижение границ слоёв связано с разуплотнённой зоной на данном участке профиля. Граница характеризуется повышенными скоростями, которые близки к скорости грунтовых вод, и, по-видимому, соответствует их уровню (УГВ). Третий слой представлен

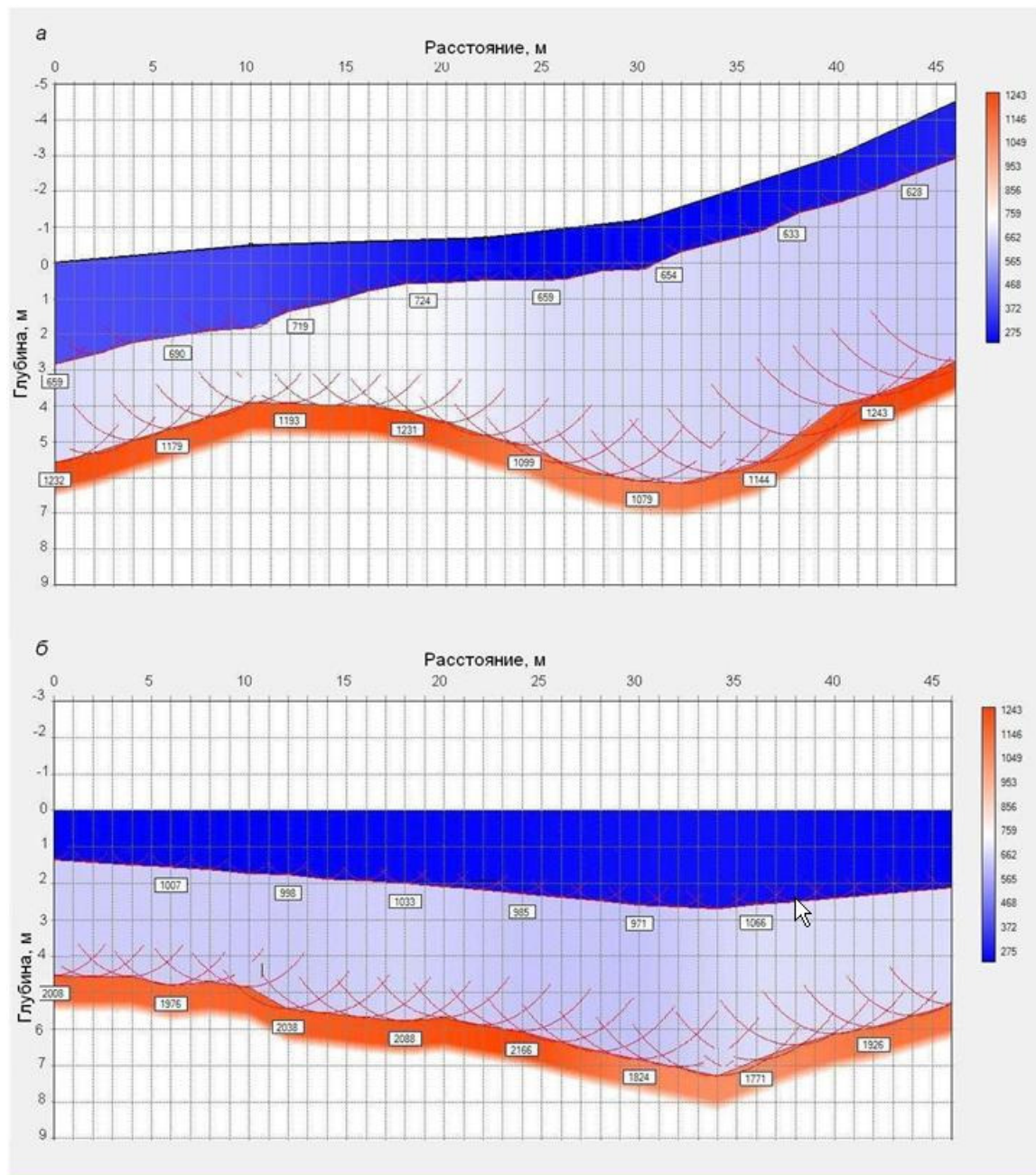


Рис. 5. Сейсмический разрезы в районе пункта ПРТ. а – СП1, б – СП2.

крупнообломочными материалами с песчаным заполнителем ледникового происхождения.

Выявленные зоны с пониженными значениями плотности скелета грунта связаны с повышенной пористостью, проницаемостью, трещиноватостью.

Георадиолокационный профиль длиной 270 м был пройден поперёк долины ручья Коркина с выходом на левую и правую террасы. Результатом георадиолокационных работ стало построение георадарного разреза, с привязкой к сейсмическим профилям (см. рис. 4а).

На георадарном разрезе хорошо выделяются три участка с резким понижением границы и бетонный мост над ручьём Коркино. Второй и третий участки

коррелируются с участками разуплотнённых зон, выявленных по результатам сейсмозондирования (см. рис. 5).

С целью определения дизъюнктивных нарушений в крест долины ручья Коркино в 2003–2005 гг. проводилась радоново-водородная съёмка. Эманиационная съёмка проводилась радиометром РГА-1, а концентрация водорода в почвенном воздухе измерялась в относительных единицах (мВ) водородным геофизическим сигнализатором ВСГ-2. На (рис. 6б) приведён схематический профиль долины ручья с результатами радоново-водородной съёмки и расположение точек регистрации в пункте ПРТ. На двух участках профиля наблюдаются

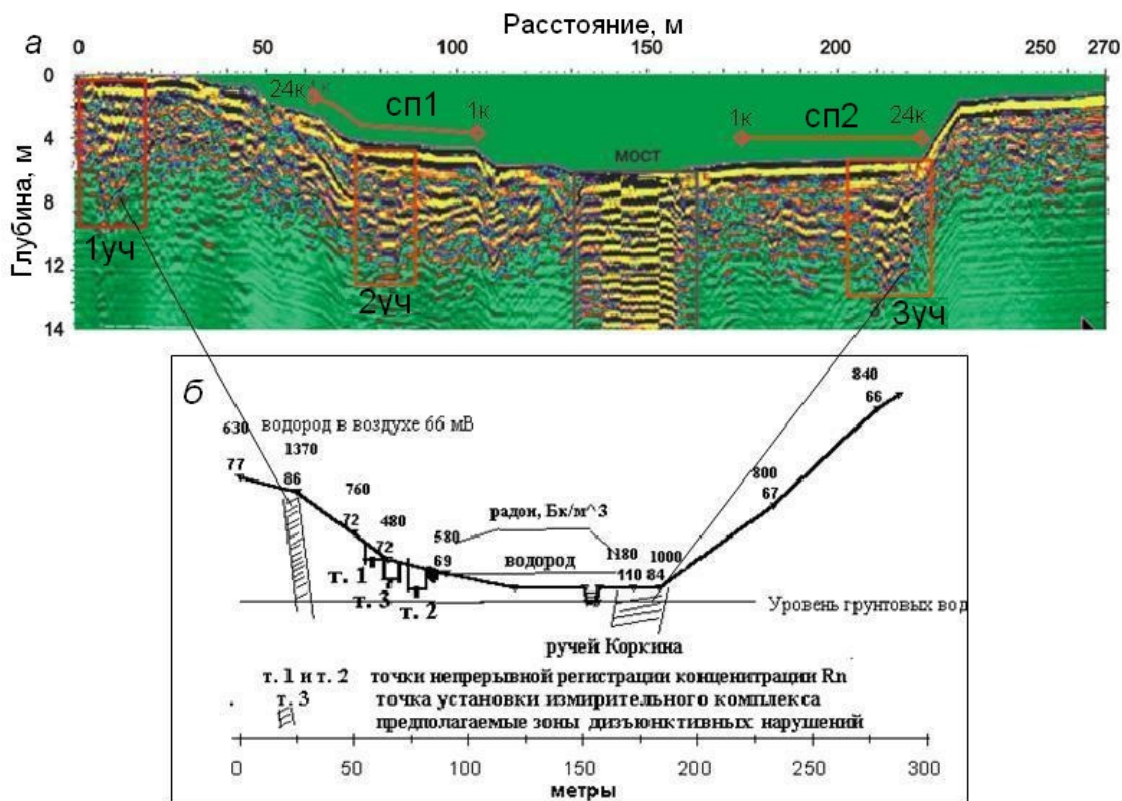


Рис. 6. Георадиолокационный разрез в пункте ПРТ (а), и радоново-водородная съёмка в крест ручья Коркина (б). т.1 – ПРТ1, т.2 – ПРТ2, 3 – ПРТ3. Штриховкой показаны предполагаемые зоны дизъюнктивных нарушений. Цифры, выделенные жирным шрифтом, – содержание водорода в мВ шкалы прибора, цифры над ними – ОА Rn в Бк/м³.

повышенные значения объёмной активности радона (ОА Rn) и водорода – на левом склоне и на дне долины, которые трассируют перекрытые рыхлыми отложениями дизъюнктивные нарушения с повышенной проницаемостью среды для почвенных газов [10]. Эти точки совпадают с зонами разуплотнения, выделенными в результате сейсморазведочных и георадарных работ.

Проведённый на участке ПРТ комплекс геофизических работ позволяет сделать следующие выводы: строение участка весьма неоднородное, осложнённое структурными нарушениями субвертикального заложения; определены плотности скелета грунта в исследуемой толще, выявлены зоны с пониженными плотностями скелета грунта; выделена граница полного влагонасыщения. Наличие разуплотнённых зон в исследуемой толще может отражать глубинный разлом. Результаты сейсморазведки подтверждаются результатами георадиолокации, хотя последние не дают возможности определения физико-механические свойства грунта, но дают возможность визуально выделить зоны с закономерным проседанием отражающих границ, что связано с разуплотнёнными зонами.

Пункт радонового мониторинга ПРТ2. В районе пункта был выполнен георадиолокационный профиль длиной 110 метров, и построен георадарный разрез (рис. 7а). Разрез представлен двумя

геологическими толщами. Первый слой представлен почвенно-пирокластическим чехлом мощностью от 2,7–3,5 м. Второй слой по данным шурфовки представлен глиной, мощность которого определить по результатам георадиолокации нельзя, так как электромагнитный импульс быстро затухает в данной среде. В разрезе выделяется одна зона с проседанием отражающих границ, возможно, связанная с разуплотнением грунта. В начале профиля хорошо выделяется насыпная часть дороги.

Пункт радонового мониторинга Карымшина. Пункт находится в долине реки Карымшина притока реки Паратунка. Для данного пункта характерны геологические условия, наблюдаемые на пункте ПРТ, так как этот пункт находится на эллювиально-делювиальных отложениях р. Карымшина. В районе пункта был выполнен георадиолокационный профиль длиной 110 метров, на основании которого был построен георадарный разрез (рис. 7б). Разрез представлен двумя геологическими толщами. Первый слой сложен почвенно-пелловым чехлом и ниже песчано-глинистым грунтом аллювиального происхождения. Второй слой представлен крупнообломочными материалами с песчаным заполнителем ледникового происхождения. На разрезе выделяется зона с понижением границы, возможно связанная с разуплотнёнными свойствами грунта.

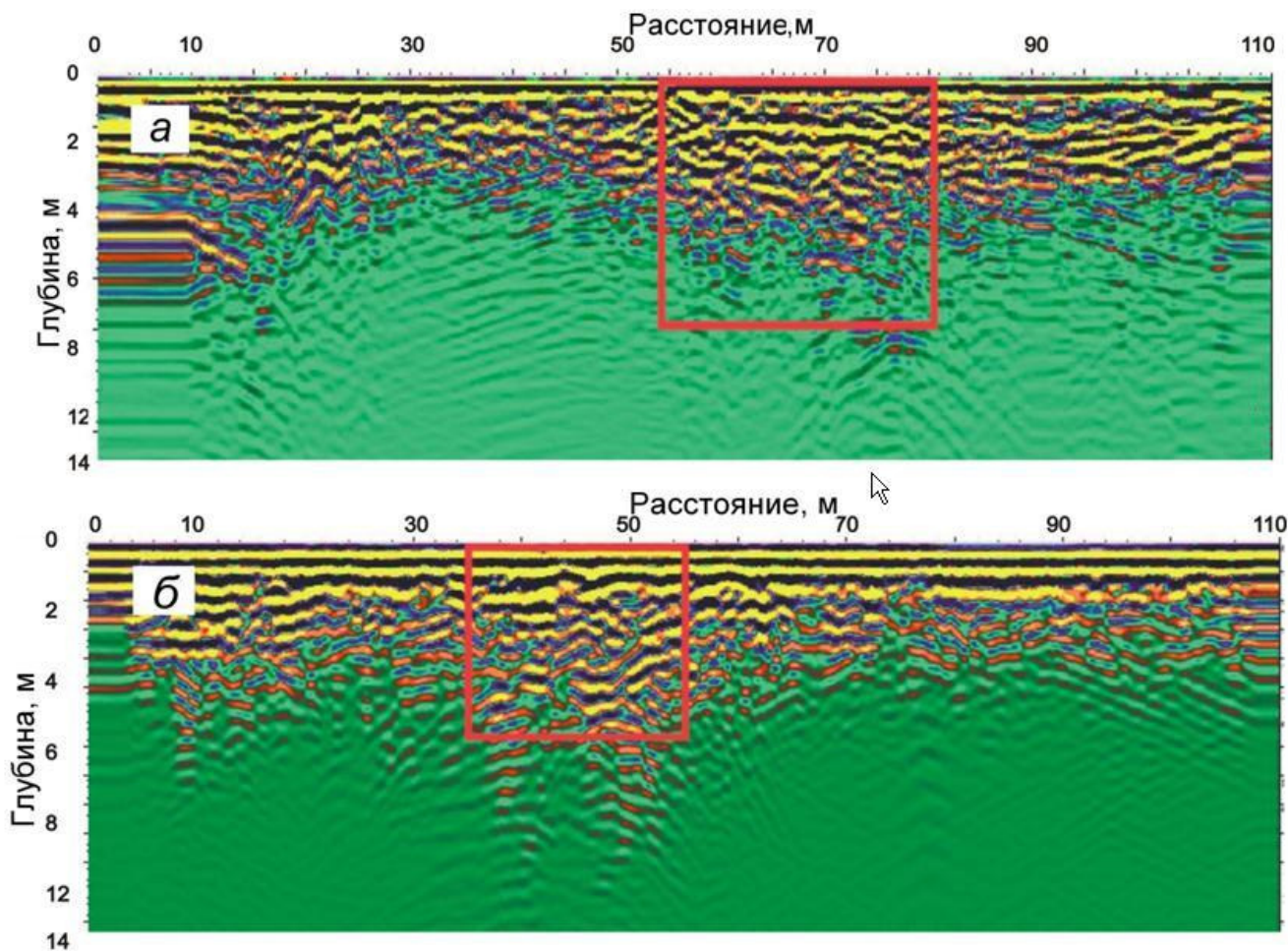


Рис. 7. Георадиолокационные разрезы: а — ПРТ2, б — КРМ. Прямоугольниками показаны зоны проседания отражающих границ.

Заключение

Согласно современным представлениям, процесс переноса радона в грунте осуществляется с помощью механизмов диффузии и адвекции. Причём если геологическая среда является трещиноватой (скальные породы), то адвекция будет главным механизмом переноса Rn , а если геосреда — пористый грунт, то в такой среде диффузия будет преобладать над адвекцией, что характерно для пунктов расположенных в районе Паратунского грабена. В каждом пункте регистрации почвенного радона имеется своё строение верхнего слоя почвы, которое влияет на особенности процесса миграции Rn . Как показано в работе [5], тектонические нарушения (разломы, трещины разного характера) могут рассматриваться в качестве открытых флюидонасыщенных коллекторов, через которые осуществляется газообмен с атмосферой.

Выполненные работы выявили ряд разуплотнённых зон в местах организации пунктов мониторинга почвенных газов, а так же границу зоны влагонасыщения, которая соответствует уровню грунтовых вод. Сейсморазведочные и георадарные профили показали, что верхняя часть геологического разреза

во всех пунктах представлена хорошо выраженным почвенно-пирокластическим слоем с плотностью $1,6-1,7 \text{ г/см}^3$ и мощностью до 2,5 м. Ниже этого слоя располагается песчано-глинистый слой аллювиального происхождения. Знание геологического разреза позволит совершенствовать модели миграции Rn в многослойных геологических средах с использованием конкретных параметров слоёв, полученных по данным сейсморазведки и георадиолокации [4, 12]

Список литературы

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Москва: МГУ, 2005. 154 с.
2. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Волошин В.Н. Аппаратурный комплекс для регистрации концентрации подпочвенных газов с целью поиска предвестниковых аномалий сильных землетрясений Южной Камчатки // Сейсмические приборы. 2012. Том. 48. № 1. С. 5–14.
3. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. Ленинград: Наука, 1989. 407 с.
4. Паровик Р.И., Фирстов П.П. Апробация новой методики расчёта плотности потока радона с поверхности

- земли // Аппаратура и новости радиационных измерений. 2009. № 3. С. 52–57
5. Рудаков В. П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ: Автореф. доктор. дис. М. 1992. 56 с.
 6. Рудаков В. П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 2009. 176 с.
 7. СНиП (строительные нормы и правила) Рекомендации. Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов для изучения физико-механических свойств грунтов. Москва: ЦНИИС, 1976. 37 с.
 8. Фирстов П. П. Мониторинг объёмной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997–1998 гг. с целью прогноза предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканонология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33–43.
 9. Фирстов П. П., Рудаков В. П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканонология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26–41.
 10. Фирстов П. П., Широков В. А., Руленко О. П. и др. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и во-
дорода с сейсмической активностью Камчатки в июле – августе 2004 г. // Вулканонология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49–59.
 11. Яковлева В. С., Каратаев В. Д. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды // Вулканонология и сейсмология. 2007. № 1. С. 74–77.
 12. Яковлева В. С., Паровик Р. И. Численное решение уравнения диффузии-адвекции радона в многослойных геологических средах // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2011. № 1 (2). С. 45–55.
 13. Djefal S., Allab M., Cherouayi D. E. Further investigation on radon emanation along seismic faults in northern Algeria // Nucl. Geophys. 1994. Vol. 8. № 6. P. 583–591.
 14. Virk H. S., Baljinder S. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena // Tectonophysics. 1993. Vol. 77. P. 215–224.
 15. Wakita H. Short term thermal and Hydrological signatures related to tectonic activities. Thermal and Hydrological signatures related to seismic events in Japan / Work-shop Walferdange. 1995. P. 29–64.