

УДК 550.338

О СВЯЗИ ДИНАМИКИ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА (^{222}Rn) И ВОДОРОДА С СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТЬЮ КАМЧАТКИ В ИЮЛЕ – АВГУСТЕ 2004 г.

© 2006 г. П. П. Фирстов¹, В. А. Широков¹, О. П. Руленко¹, В. С. Яковлева², А. В. Исаев²,
О. П. Малышева¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

²Томский политехнический университет, Томск, 634034

Поступила в редакцию 12.05.2005 г.

Проведено сопоставление вариаций объемной концентрации радона и молекулярного водорода в подпочвенном воздухе на сети станций Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона с сейсмической активностью Камчатки. На основе анализа связи сейсмичности региона и вариаций плотности потока радона показано, что аномальные вариации массопереноса радона обусловлены как изменениями сейсмичности региона в целом, так и участка зоны субдукции района полигона. По временам начала вступлений радоновых аномалий рассчитаны азимуты прихода “деформационных волн”, которые совпадают с направлениями на эпицентры произошедших землетрясений. Зарегистрированные геохимические аномалии, предположительно, имеют деформационную природу и обусловлены процессами “квазивязкого” течения литосферы во время перестройки поля тектонических напряжений зоны субдукции. В динамике водорода выявлен краткосрочный (время упреждения $T < 14$ дней) предвестник роя землетрясений 4–5 августа 2005 г. с максимальной магнитудой $M_{\text{max}} = 5.8$ и эпицентральной дистанцией около 130 км от пункта регистрации.

В начале XX в. основоположник российской сейсмологии Б.Б. Голицин высказал идею о целесообразности использования изменений химического состава подземных вод и подпочвенного воздуха для прогноза землетрясений. За прошедшее столетие эта идея была реализована многими исследователями и нашла широкое применение в практике. Наиболее технологичным методом в геохимических исследованиях, направленных на прогноз землетрясений, является мониторинг концентрации радона, растворенного в водах подземных резервуаров и в подпочвенном воздухе. Он основан на хорошо разработанной теории массопереноса радона и на эманационном методе картирования с целью поиска месторождений радиоактивных руд, который начал развиваться в 1930-е годы XX в. [2]. Начиная с 1970-х годов XX в., после публикации классической работы [16], радоновый метод стал активно использоваться во всех сейсмоактивных регионах мира [20, 23, 24]. С середины 80-х годов наблюдается повышение интереса к изучению сейсмоэманационных эффектов геологических структур во многих регионах мира [18, 27–29].

Как показал печальный опыт катастрофического землетрясения с моментной магнитудой $M = 9$, произошедшего 26 декабря 2004 г. в Индийском океане, в результате которого под волной цунами и при разрушениях погибло более 300 тыс. че-

ловек, прогноз сильных землетрясений остается крайне важной задачей для человечества.

Полувековые работы по регистрации радона, проведенные в разных геологических структурах с использованием различной аппаратуры, показали перспективность сейсмоэманационного метода [11, 19, 21]. Поэтому дальнейшее развитие и совершенствование этого метода как в методическом [17, 25, 26], так и в аппаратном [22] плане имеет важное значение для решения задач геодинамики и прогноза землетрясений.

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в 1997–2000 гг. была создана сеть пунктов мониторинга подпочвенного радона для поиска предвестников сильных землетрясений Авачинского залива [14, 15], которая в последующие годы расширялась и модернизировалась. В данной статье рассматриваются особенности отклика в массопереносе подпочвенного радона на изменения напряженно-деформированного состояния литосферы на северном фланге Курило-Камчатской зоны субдукции в июле–августе 2004 г. с целью изучения природы и выявления краткосрочных предвестников сильных землетрясений.

Характеристика района исследований и методика наблюдений. В рассматриваемый период работала сеть из четырех пунктов (рис. 1, табл. 1). Пункты ПРТ и ИКР располагаются в северной части Паратунской гидротермальной системы, которая структурно приурочена к грабену се-

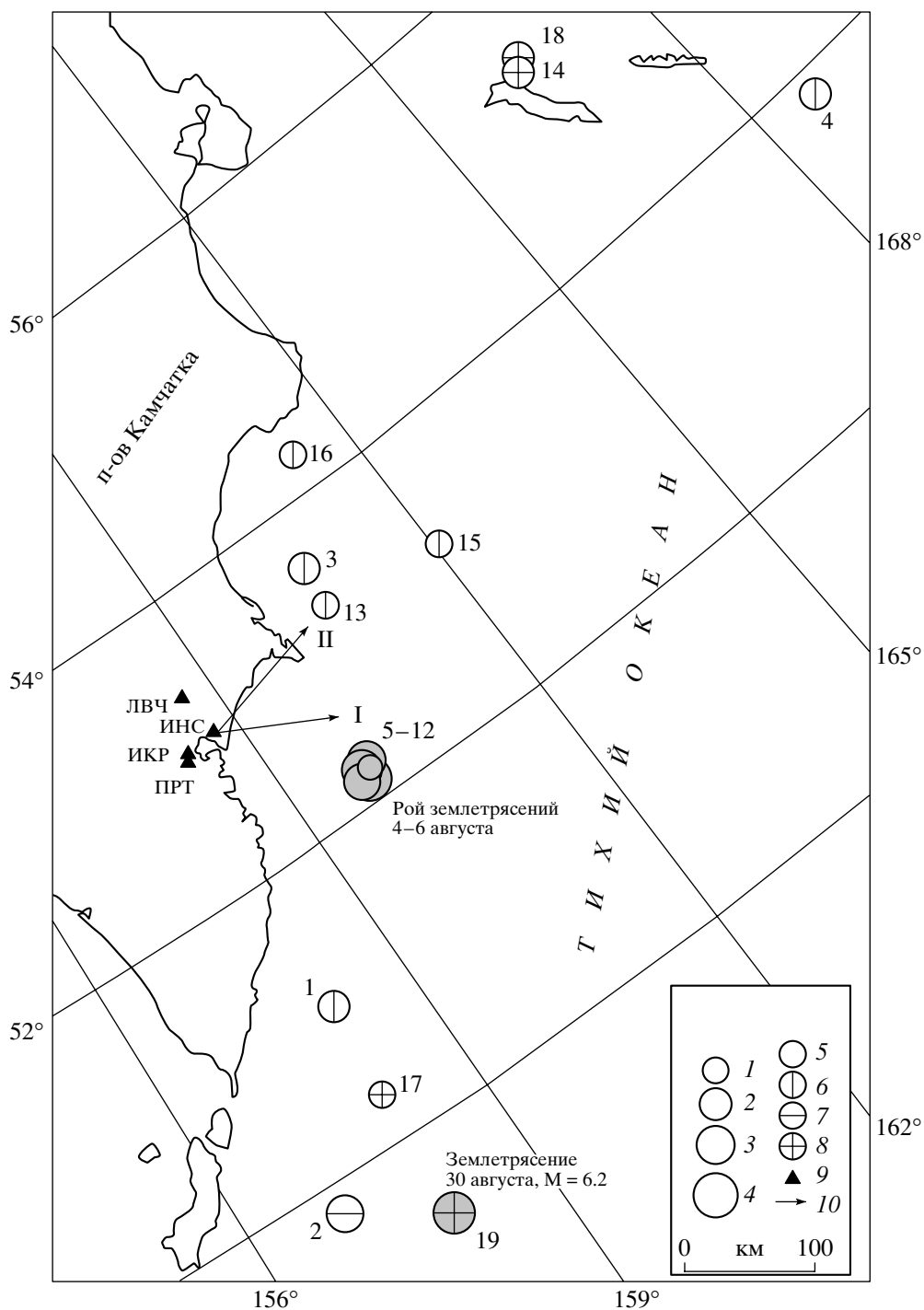


Рис. 1. Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга в 2004 г. и карта эпицентров землетрясений за период 12 июля – 1 сентября 2004 г. Эпицентры землетрясений с энергетическим классом K : 1 – 11; 2 – 12; 3 – 13; 4 – 14 и глубиной очага; 5 – 0–19 км; 6 – 20–39 км; 7 – 40–59 км; 8 – 60–100 км; 9 – пункты наблюдений: ЛВЧ – Левая Авача; ИНС – Институт вулканологии и сейсмологии (четыре точки); ИКР – Институт космофизических исследований и распространения радиоволн; ПРТ – Паратунка; 10 – азимут на источник “геодеформационных” волн.

ро-восточного простирания, параллельному Камчатскому участку зоны субдукции (рис. 2). Паратунский грабен расположен в южной части Начикинской складчато-глыбовой зоны, структурной особенностью которой является глыбовая текто-

ника [13]. Мозаика блоков обусловлена сочетанием движений по системе долгоживущих разрывов следующих главных направлений (по возрасту заложения от молодых к древним): меридиональные (азимуты простирания СЗ 350° – С 0°); суб-

Таблица 1. Координаты пунктов регистрации концентрации Rn в подпочвенном газе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона в июле–августе 2004 г.

| № | Название | Сокращение | Координаты | | Краткая характеристика места расположения пунктов и условий регистрации |
|---|---|------------|------------|--------|---|
| | | | φ | λ | |
| 1 | Паратунка (опорная станция) | ПРТ | 52.90 | 158.26 | <i>Гидротермальная система, зона динамического влияния разлома, трассируемого р. Коркина.</i> Две разноглубинные точки (т. 1 – зона аэрации; т. 2 – зона полного влагонасыщения). |
| 2 | Институт космофизических исследований | ИКР | 53.00 | 158.32 | <i>Речная терраса р. Паратунка (2 км от берега).</i> Две разноглубинные точки (т. 1 – 0.8 и т. 2 – 1.35 м от поверхности). |
| 3 | Левая Авача | ЛВЧ | 53.50 | 158.19 | <i>Речная терраса р. Левая Авача (150 м от берега).</i> Активный разлом, две разноглубинные точки в зоне аэрации (т. 1 – 0.85 и т. 2 – 1.9 м). |
| 4 | Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН | ИНС1 | 53.07 | 158.61 | <i>Отложения древних пирокластических потоков.</i> В подвале здания Института. |
| | | ИНС2 | | | В бункере скважины ИНС-1, зона аэрации. |
| | | ИНС3 | | | В обсадной трубе скважины на глубине 5 м. |
| | | ИНС4 | | | Поток радона с поверхности земли в бункере. |

широтные (ВСЗ 85° – ВЮВ 120°); северо-западные (СЗ 320° – СЗ 340°); северо-восточные (СВЗ 50° – 70°); субмеридиональные (ССВ 10°–20°).

Большинство разломов выражено в рельефе, а в долине р. Паратунка под рыхлым чехлом они прослежены геофизическими методами. Между ограничивающими грабен разломами в его дне геофизическими методами выявлено несколько глубинных разломов, разделяющих всю структуру на четыре основных блока. Опорный пункт ПРТ располагается на речной террасе р. Коркина, который трассирует субширотный разлом в пределах блока III Паратунского грабена, а пункт ИКР расположен почти в центре небольшого блока (рис. 2). К Паратунскому грабену приурочена одноименная геотермальная система. На расстоянии около 700 м от пункта ПРТ ниже по течению ручья находятся естественные выходы термальных вод с содержанием растворенного Rn до 1500 Бк/м³.

С целью определения дизъюнктивных нарушений вкрест долины р. Коркино была проведена радоново-водородная съемка. Эманационная съемка проводилась радиометром РГА-1, а концентрация водорода в подпочвенном воздухе измерялась в относительных единицах (мВ) водородным геофизическим сигнализатором ВСГ-2. На рис. 2б приведен схематический профиль долины ручья, результаты радоново-водородной съемки и расположение датчиков пункта ПРТ. На двух участках профиля – на левом склоне и на дне долины наблюдаются повышенные значения объемной активности радона (ОА Rn) и водорода. Эти участки трассируют перекрытые рыхлыми отложениями дизъюнктивные нарушения с повышенной проницаемостью среды для подпочвенных газов. На участке профиля, где установлены датчики для непрерыв-

ных наблюдений, наблюдается фоновый уровень концентрации радона и водорода. Это свидетельствует о квазиоднородности геологической среды на этом участке.

Пункты ИНС и ЛВЧ расположены в районе Петропавловского горста. Пункт ИНС расположен вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии, пункт ЛВЧ – на берегу р. Левая Авача (ЛВЧ) в зоне разлома, который трассируется руслом реки.

Все пункты сети оснащены радиометрами “РЕВАР”, в которых в качестве датчиков используются газоразрядные счетчики типа СТС-6. На пункте ПРТ регистрация ОА Rn проводилась в аллювиальных отложениях на глубине один метр от поверхности в двух т. х – в зоне аэрации (подсобное помещение, врезанное в склон – т. 1) и в зоне полного влагонасыщения (подвал под домом – рис. 2б, т. 2). В т. 2 велись также наблюдения за концентрацией молекулярного водорода в подпочвенном воздухе водородным геофизическим сигнализатором ВСГ-2. Регистрация концентрации водорода, температуры воздуха и атмосферного давления осуществлялась с помощью 6-канального контроллера “РЕГИН” с накоплением данных на твердотельную память.

В пункте ИКР два датчика радиометра РЕВАР установлены в аллювиальных отложениях на глубинах 0.8 и 1.35 м, причем в этом пункте на глубине 1.5 м располагается верхняя кромка глинистого водоупорного слоя мощностью около 20 см.

Полученные значения β-распадов в минуту (N) пересчитывались в объемную активность радона на основании эмпирической зависимости $A_{Rn} \text{ (Бк/м}^3\text{)} = 9N \text{ (имп/мин)}$ по результатам выполненной ра-

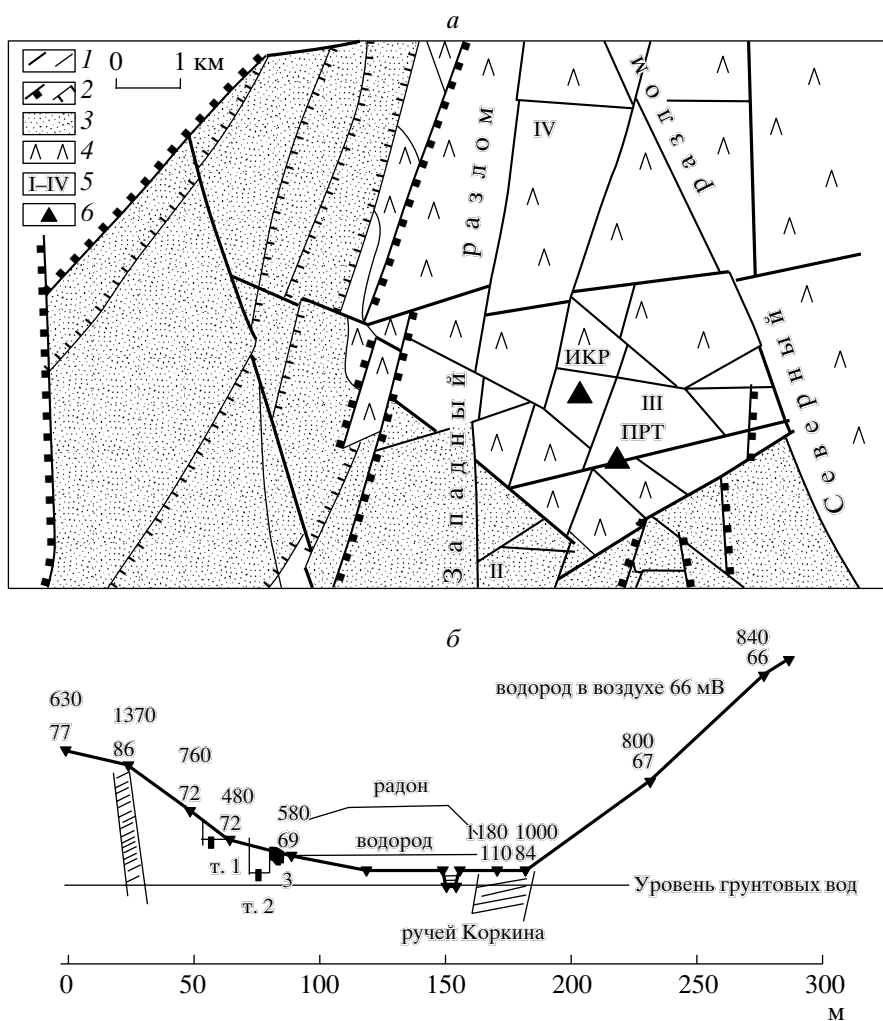


Рис. 2. Схематическая структурная карта района опорного пункта ПРТ по данным работы [13] (а): 1 – разрывные нарушения (толстые линии – главные, тонкие линии – более низких порядков); 2 – те же, с указанием направления падения плоскости сместителя; 3 – вулканиты паратунской толщи; 4 – вулканиты алнейского комплекса; 5 – поперечные блоки в дне Паратунского грабена (II–IV); 6 – пункты регистрации подпочвенного радона. Результаты радоново-водородной съемки вкрест ручья Коркина (б): т. 1 и т. 2 – точки непрерывной регистрации концентрации R_n (РЕВАР); 3 – т. установки пленочных детекторов. Штриховкой показаны предполагаемые зоны дизъюнктивных нарушений. Цифры, выделенные жирным шрифтом, – содержание водорода в мВ шкалы прибора, цифры над ними – ОА R_n в Бк/м³.

нее калибровки [14]. Измерения всех параметров проводились с частотой дискретизации 2 цикл/ч.

С целью изучения особенностей массопереноса почвенных газов с 12 июля по 26 августа проводился комплексный эксперимент в пункте ПРТ. В дополнение к стандартным измерениям осуществлялась регистрация ОА R_n с помощью трековых детекторов. В 15-ти метрах от точки 1 в шпурах глубиной 50 см (h_1) и 100 см ($h_2 = 2h_1$), обсаженных полиэтиленовой трубой диаметром 5.5 см, помещались нитратцеллюлозные трековые детекторы α -частиц типа III-b площадью 10×10 мм². Шпуры герметично закрывались. Всего было проведено 10 серий измерений. Время экспонирования детекторов составляло 4–5 сут. ОА R_n в почвенном воздухе опре-

делялась по трековым детекторам согласно инструкции по эксплуатации комплекса АИСТ-ТРАЛ [8]. Погрешность измерений не превышала 25%.

Изучение пространственно-временных характеристик сейсмичности проводилось по данным оперативного каталога землетрясений Камчатского филиала (КФ) Геофизической службы РАН.

Результаты наблюдений за объемной активностью радона и концентрацией водорода в подпочвенном воздухе. Результаты радонового мониторинга за период 12 июля–1 сентября 2004 г. приведены на рис. 3а–3в. Сплошными вертикальными линиями отмечены моменты возникновения сильных землетрясений Южной Камчатки

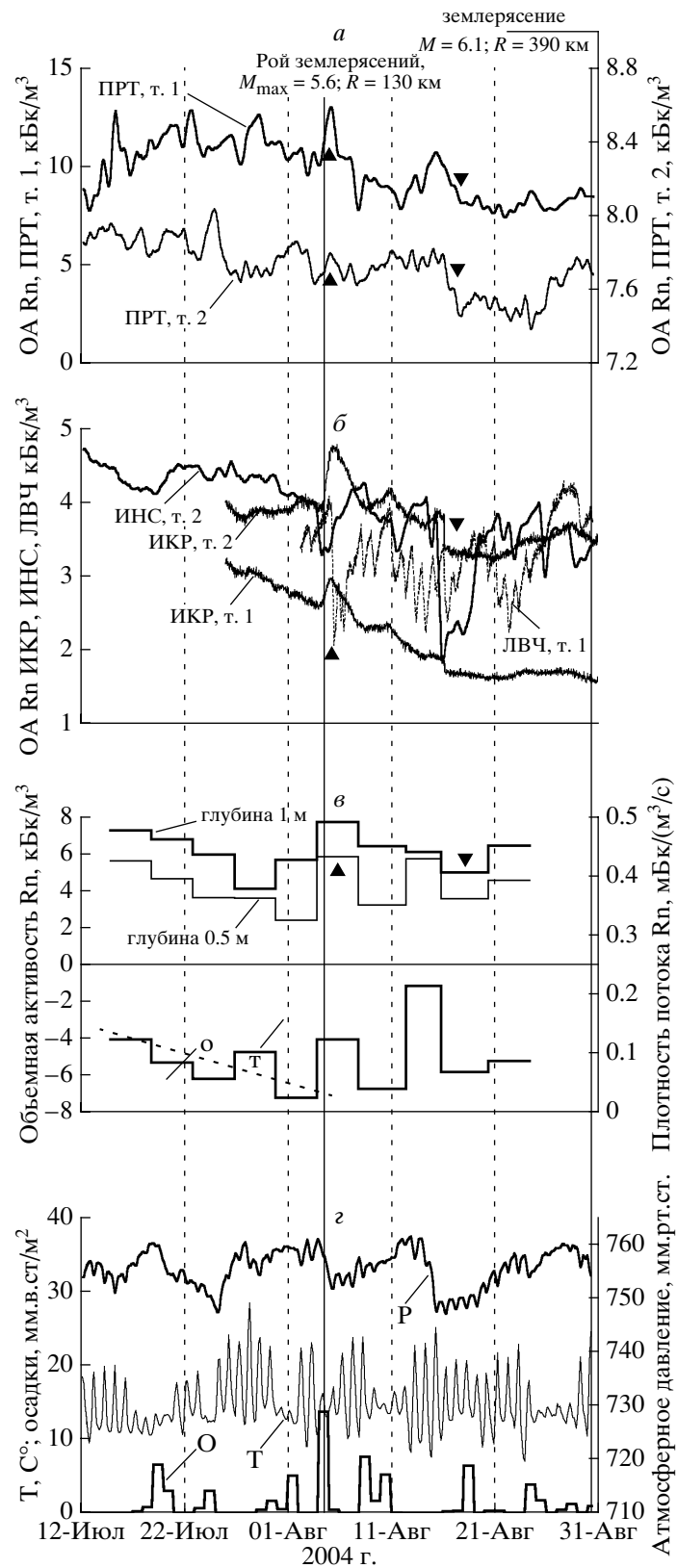


Рис. 3. Зарегистрированная объемная активность радона: а – радиометрами РЕВАР в пункте ПРТ; б – в пунктах ИКР, ИНС, ЛВЧ; в – на разных глубинах от поверхности земли трековыми детекторами и вычисленная плотность потока радона; г – метеопараметры; О – осадки, Т – температура воздуха, S^0 , P – атмосферное давление.

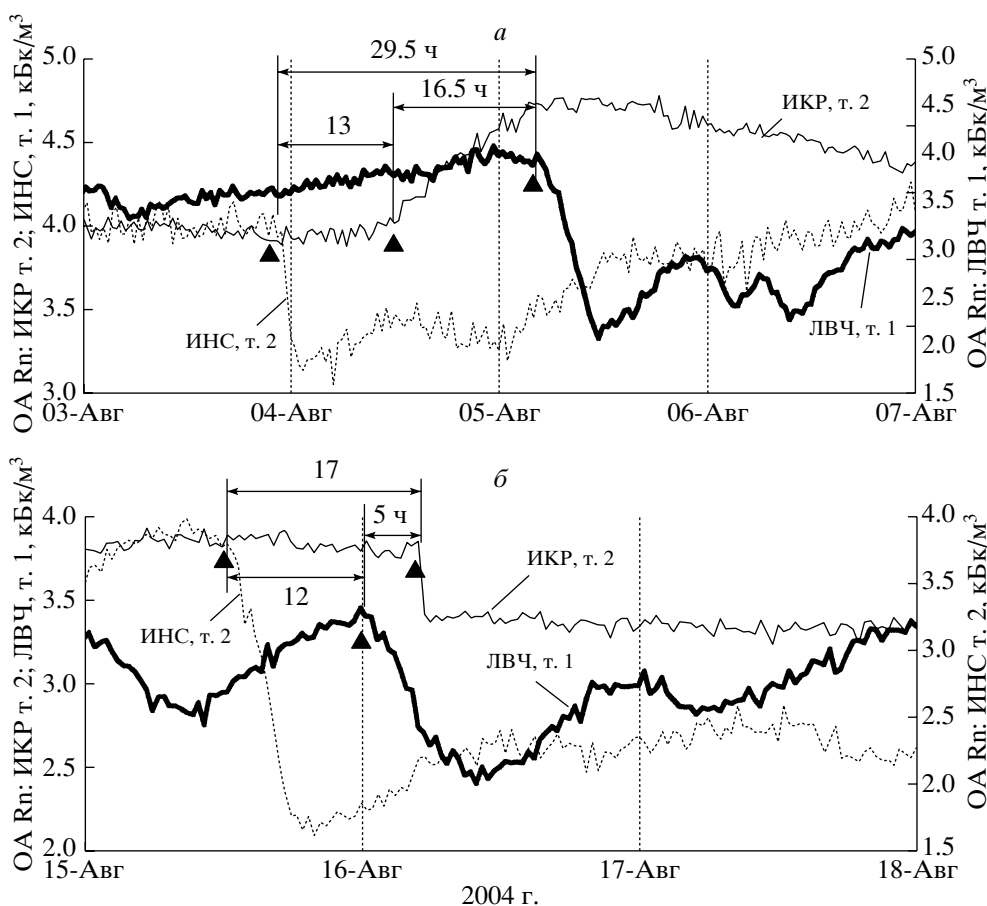


Рис. 4. Динамика $OA Rn$ в пунктах ИКР, ИНС, ЛВЧ; а – 3–6 августа; б – 15–17 августа. Треугольниками показаны времена начала аномалий на каждой станции, цифрами указано время запаздывания начала аномалий относительно первой станции.

(4 августа с $M = 5.8$ и 30 августа с $M = 6.1$) и время появления ступенчатой радоновой аномалии 16 августа. Общеизвестна хорошо выраженная зависимость $OA Rn$ в подпочвенном воздухе от метеорологических параметров, поэтому на рис. 3г приведены графики изменения температуры воздуха (T), атмосферного давления (P) и осадков (O).

На рис. 3а показана динамика $OA Rn$ на опорном пункте ПРТ в двух т. х (т. 1 – зона аэрации, т. 2 – зона полного влагонасыщения), где треугольниками отмечена фазовая корреляция сигналов 4 и 16 августа. Как было показано в [15], синхронное увеличение $OA Rn$ в обеих т. х пункта ПРТ как в зоне полного влагонасыщения, так и в зоне аэрации, которое отмечено 4 августа (рис. 3а), свидетельствуют об увеличении скорости конвективного потока подпочвенных газов в результате изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды. Следует отметить, что бухтообразная положительная аномалия наблюдается 4–6 августа и в пункте ИКР, который расположен также в пределах Паратунского грабена. В двух других пунктах (ИНС, ЛВЧ, рис. 1)

эта аномалия имеет бухтообразную форму с резким передним фронтом (рис. 3б). Качественно похожая по форме, но более слабая аномалия проявляется на всех пунктах 12 августа. Аномалия 16 августа, в отличие от предшествующих, представляет собой синхронное уменьшение $OA Rn$ в обеих т. х пункта ПРТ и почти ступенчатое уменьшение значений $OA Rn$ в других пунктах ИНС, ИКР, ЛВЧ (рис. 3б). Аномалии 4 и 16 августа прослеживаются и на кривых, полученных интегральным методом с использованием трековых детекторов. Первая аномалия проявляется в увеличении значений $OA Rn$, а вторая – в их уменьшении на ~25% на обеих глубинах (рис. 3в, верхняя кривая).

На рис. 4 более детально представлена динамика $OA Rn$ за 3–6 (рис. 4а) и 15–17 августа (рис. 4б) в трех пунктах, образующих треугольник с апертурой ~70 км (ИКР, ИНС, ЛВЧ). С определенной долей условности выделены вступления аномалий и определены времена их запаздывания относительно первого пункта, которым в обоих случаях является ИНС. При допущении плоского фронта распространяющейся с постоянной ско-

ростью волны, по разности запаздывания вступлений на пунктах регистрации рассчитан азимут ее прихода, который составил $105^\circ \pm 15^\circ$ в первом и $72^\circ \pm 13^\circ$ во втором случае (рис. 1). При этом скорость распространения “геодеформационной волны” оценивается соответственно.

С целью выявления общих элементов поведения в динамике ОА Rn на пунктах, расположенных в Паратунском грабене, на основе четырехмерного ряда (пункты ПРТ и ИКР по две точки) по методике А.А. Любушина [6] построен агрегированный сигнал. В агрегированном сигнале четко выделяется аномалия 4 августа и более слабо прослеживаются возмущения 11 и 16 августа (рис. 5в).

Для пунктов, где велись наблюдения на разных глубинах, рассчитывалась плотность потока радона (ППР) с поверхности земли по формуле [12]:

$$q(z)|_{z=0} = D_e \eta \frac{A_1}{2 - \frac{A_2}{A_1} h_1} \frac{1}{h_1} \ln \left(\frac{1}{\frac{A_2}{A_1} - 1} \right)$$

где A_1 и A_2 – объемная активность радона на глубинах h_1 и h_2 при $h_2/h_1 = 2$; D_e – коэффициент диффузии; η – пористость среды. В расчетах принимались данные для слабо увлажненных аллювиально-делювиальных отложений $D_e = 0.0055 \text{ см}^2/\text{с}$ и $\eta = 23\%$ [9]. Плотность потока радона, вычисленная по этой методике, для пунктов ИКР и ЛВЧ приведена на рис. 5в, а для пункта ПРТ – на рис. 3в.

На рис. 5г пунктирной линией представлен график изменения концентрации молекулярного водорода в подпочвенном воздухе. Наблюдается хорошо выраженная зависимость концентрации водорода от температуры (коэффициент корреляции 0.4). Концентрация водорода, скорректированная на температуру по методике А.А. Любушина [5] и осредненная скользящим средним по 24 точкам, приведена на рис. 5г (жирная линия). Среднее значение концентрации молекулярного водорода в милливольтках на выходе прибора за два месяца наблюдений составляет $m = 64 \pm 40 \text{ мВ}$. С 27 июля по 4 августа значения концентрации водорода превосходили 100 мВ, поэтому этот период в первом приближении можно считать аномальным (рис. 5г, штриховка).

Сейсмичность северного фланга Курило-Камчатской зоны субдукции. Происходящие в Курило-Камчатском регионе землетрясения являются отражением меняющейся во времени перестройки полей сейсмостектонических напряжений, связанных с процессом взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской тектонических плит. Для периода с 10 июля по 31 августа были проведены исследования пространственно-временных характеристик сейсмичности на северном фланге Ку-

рило-Камчатской зоны субдукции на участке от Командорских островов на севере и до острова Парамушир на юге.

В табл. 2 приведен каталог, а на рис. 1 показаны эпицентры землетрясений с энергетическим классом $K_s^{Ф68} \geq 10.5$ и глубинами очагов $H \leq 100 \text{ км}$, произошедших в исследуемом районе в июле – августе 2005 г. (оперативные данные КФ ГС РАН). На рис. 4б показано их распределение во времени. В районе Авачинского залива 4–5 августа произошел рой землетрясений, причем два наиболее сильных события роя с $K_s = 13$ (локальная магнитуда $M = 5.8^1$) ощущались в г. Петропавловске-Камчатском силой 2–3 балла по 12-балльной шкале MSK-64. Самое сильное землетрясение в рассматриваемый период времени с $K = 13.5$ ($M = 6.1$) произошло 30 августа 2004 г. в южной части района (табл. 2).

Для рассматриваемого нами периода можно выделить 4 фазы сейсмической активности, различающиеся между собой по плотности числа землетрясений в единицу времени ($n = N/t$), где N – число событий в соответствующей фазе, t измеряется в сут. Параметр n в первом приближении характеризует величину скорости сейсмостектонического движения [10]. Первая фаза соответствует временному интервалу 12 июля – 3 августа. Вторая, соответствующая рою землетрясений в Авачинском заливе, – 4–6 августа, третья – 7–15 августа, четвертая – 16–30 августа 2004 г. В первой фазе плотность n числа землетрясений в сутки была близкой к фоновому значению ($n = 0.17$). Минимальной была величина n в третьей фазе (0.1). Во второй и четвертой фазах значения n были значительно больше. Однако, если во второй фазе сейсмический процесс был локализован в небольшой области Авачинского залива, то в четвертой фазе землетрясения происходили вдоль всей исследуемой территории, от Командорских островов на севере до района острова Парамушир на юге.

Обсуждение результатов. Сопоставим данные радоново-водородного мониторинга с выделенными фазами сейсмической активности. Фаза I, по-видимому, связана с релаксацией поля тектонических напряжений после наиболее сильного на Камчатке в 2004 г. землетрясения, произошедшего в районе Кроноцкого мыса 10 июня с $K = 14.0$ ($M = 6.4$) и $H = 200 \text{ км}$. Через 16 сут после землетрясения в этом же районе 26–27 июня произошел рой мелкофокусных землетрясений с $K_{\max} = 11.6$, а 4–6 августа возник более мощный рой землетрясений ($K_{\max} = 13.0$) в районе Авачинского залива (рис. 1). По-видимому, этому рою

¹ Локальная магнитуда рассчитывается по формуле $M = 0.5K_{\text{оп}} - 0.65$, где $K_{\text{оп}}$ – энергетический класс для S-волн по оперативным данным.

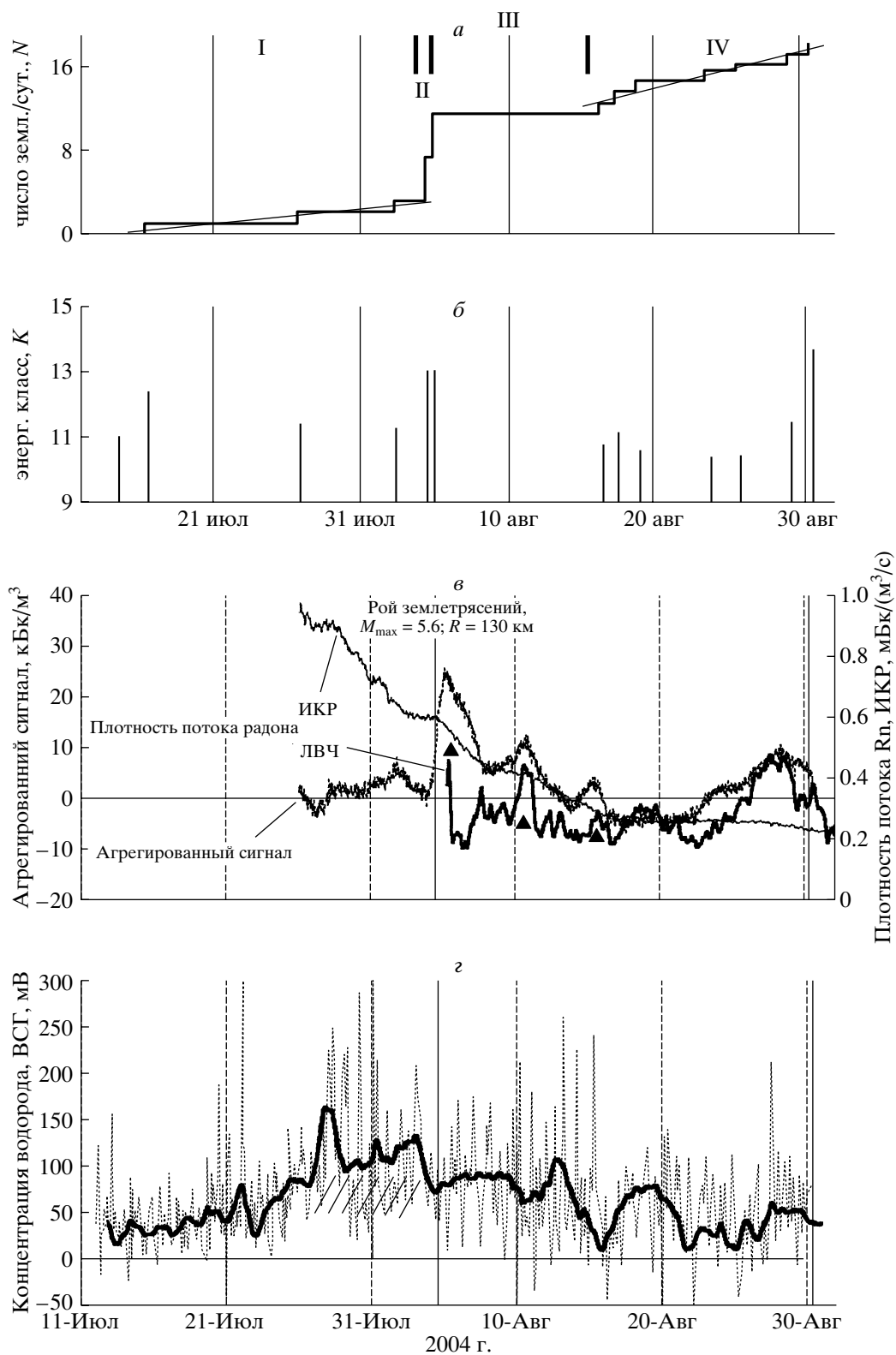


Рис. 5. Кумулятивный график (а), число землетрясений с $K \geq 10.5$ в сут., I, II, III, IV – фазы сейсмической активности; максимальный энергетический класс (б); агрегированный сигнал ОА R_n , построенный по четырем временным рядам данных пунктов ПРТ и ИКР, и плотность потока радона, вычисленная для пунктов ИКР и ЛВЧ (в); концентрация молекулярного водорода (г): пунктирная линия – экспериментальные данные; жирная линия – данные, скомпенсированные на температуру и осредненные скользящим средним по 24 точкам; штриховкой показана anomalous концентрация.

Таблица 2. Каталог землетрясений Камчатки с $K \geq 10.5$ за период 12 июля–30 августа 2005 г.

| № | Дата, дд. мм. г. | Время, чч:мм:сс | Широта, гр. с.ш. | Долгота, гр. в.д. | Глубина, км | Энергетиче- ский класс |
|----|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------|---------------------------|
| 1 | 14.07.2004 | 07:23:11 | 51.02 | 158.10 | 35 | 11.2 |
| 2 | 16.07.2004 | 08:24:49 | 49.79 | 156.99 | 19 | 12.5 |
| 3 | 26.07.2004 | 15:34:13 | 53.59 | 160.65 | 38 | 11.5 |
| 4 | 02.08.2004 | 06:23:01 | 53.82 | 168.74 | 20 | 11.4 |
| 5 | 04.08.2004 | 09:48:29 | 52.22 | 159.92 | 11 | 12.9 |
| 6 | 04.08.2004 | 09:51:04 | 52.29 | 159.96 | 11 | 12.2 |
| 7 | 04.08.2004 | 09:53:07 | 52.27 | 159.90 | 19 | 10.9 |
| 8 | 04.08.2004 | 11:03:31 | 52.24 | 159.84 | 5 | 13.0 |
| 9 | 04.08.2004 | 20:05:15 | 52.17 | 159.84 | 5 | 12.2 |
| 10 | 04.08.2004 | 21:15:11 | 52.15 | 159.86 | 4 | 13.0 |
| 11 | 04.08.2004 | 22:56:06 | 52.18 | 159.77 | 5 | 12.1 |
| 12 | 04.08.2004 | 23:56:41 | 52.22 | 159.94 | 6 | 10.9 |
| 13 | 16.08.2004 | 07:01:13 | 53.30 | 160.59 | 27 | 10.9 |
| 14 | 17.08.2004 | 08:19:51 | 55.39 | 166.43 | 37 | 11.2 |
| 15 | 18.08.2004 | 19:01:10 | 53.18 | 162.06 | 33 | 10.7 |
| 16 | 23.08.2004 | 14:07:15 | 54.27 | 161.34 | 35 | 10.5 |
| 17 | 25.08.2004 | 15:19:07 | 50.34 | 158.02 | 53 | 10.5 |
| 18 | 29.08.2004 | 00:55:05 | 55.31 | 166.31 | 40 | 11.5 |
| 19 | 30.08.2004 | 12:23:21 | 49.39 | 157.94 | 52 | 13.5 |

предшествовало увеличение сейсмотектонических деформаций на соответствующем участке Курило-Камчатской зоны субдукции, что нашло отражение в закономерном уменьшении плотности потока радона в районе Паратунского грабена (пункты ПРТ и ИКР) и краткосрочной аномалии в концентрации молекулярного водорода в пункте ПРТ длительностью около 8 сут (рис. 5в, 5г).

В последние годы многие исследователи обращают внимание на изменения реологических свойств геоматериала в процессе подготовки землетрясения. В [7] показано, что в зоне будущего очага землетрясения хрупкому разрушению предшествует квазивязкое течение горных масс в результате ползучести (крипа), причем длительность этой стадии составляет не менее 10 ч до сейсмического события. Рассмотрим более подробно аномалию в динамике ОА Rn 4–5 августа. Предположим, что эта аномалия является реакцией поля подпочвенного радона на деформирование блочных массивов горных пород в результате квазивязкого течения горных масс (“геодеформационная волна”). В пользу данного предположения свидетельствует азимут подхода аномалии на пункты регистрации радона, который близок к направлению на эпицентральную область роевой последовательности землетрясений 4 августа (рис. 1), а также тот факт, что в агрегированном сигнале она начала формироваться за 11 ч перед

началом роя землетрясений (рис. 5в). Эту аномалию можно рассматривать как оперативный предвестник роя землетрясений с упреждением менее суток.

Как показано в экспериментальной [4], резкие изменения напряженно-деформированного состояния контактов между блоками, в том числе кратковременные, могут приводить к возникновению межблоковых перемещений, которые проявляются в виде “квазивязкого” течения материала земной коры. По-видимому, процесс ползучести за счет квазивязкого течения горных масс порождает “геодеформационные волны”, обусловленные взаимодействием отдельных блоков геологической среды. Этот процесс воздействует на поле радона, причем аномалии могут иметь различную форму, в зависимости от расположения пунктов регистрации относительно границ отдельных блоков,

На заключительной стадии фазы III (15–16 августа), по-видимому, произошло увеличение скорости сейсмотектонических движений, обусловленных квазивязким течением, что привело к возникновению “геодеформационной волны” за счет межблоковых перемещений и отклика в поле радона в виде аномалии, азимут прихода которой близок к направлению на эпицентр первого землетрясения в фазе IV с $K = 10.9$, произошедшего 16 августа на юге Кроноцкого залива (№ 13, рис. 1). В [3] показано, что перед сильными землетрясе-

ниями Камчатки, происходящими на расстоянии более 100 км от пункта регистрации, возникают аномалии в геоакустической эмиссии на частотах больше 1 кГц. Причем пеленг на источник аномального сигнала совпадает с азимутом на эпицентр землетрясения. Так как на таких частотах затухание сигнала в земной коре очень велико, то источником этих аномалий может быть только объем геоматериала, расположенный не далее нескольких сотен метров от пункта приема. Этот факт свидетельствует в пользу возникновения геодеформационных волн в результате “квазивязкого” течения литосферы на заключительной стадии подготовки землетрясения.

Следует отметить, что 15–16 августа также выявлены аномалии в динамике геоакустической эмиссии (устные сообщения В.А. Гаврилова, А.В. Купцова), что указывает на масштабность процесса, по-видимому, обусловленного возникновением пластических деформаций в зоне субдукции.

В настоящее время считается общепринятым [1], что потоки молекулярного водорода трассируют глубинные разломы и реагируют на изменения напряженно-деформированного состояния среды. Поэтому можно ожидать, что отклик в динамике подпочвенного водорода на изменение напряженно-деформированного состояния литосферы будет наблюдаться значительно раньше, чем в динамике подпочвенного радона. Поэтому превышение концентрации молекулярного водорода 27 июля – 4 августа более чем в два раза относительно среднего значения (рис. 5г) можно также рассматривать как краткосрочный предвестник роя землетрясений 4–5 августа, $M_{\max} = 5.8$.

Заключение. На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. На сети пунктов мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском полигоне в период 12 июля – 30 августа 2005 г. зарегистрированы аномальные возмущения. По временам их прихода на треугольник станций оценены азимуты на источник, которые удовлетворительно совпадают с направлением на эпицентры соответствующих землетрясений. Эти аномалии рассматриваются как реакция поля подпочвенного радона на процессы подготовки роя землетрясений 4–5 августа и землетрясения 16 августа (табл. 2). По-видимому, выделенные радоновые аномалии можно рассматривать как отклик изменения массопереноса Rn в геосреде на “геодеформационные волны”, обусловленные пластическими деформациями в зоне субдукции, которые могут предшествовать землетрясениям.

2. Сопоставление результатов радонового мониторинга и пространственно-временных характеристик сейсмичности показало удовлетворительное совпадение времен основных реперных точек по обоим видам наблюдений. Резкое возрастание

амплитуды агрегированного сигнала четырехмерного ряда данных радонового мониторинга за 11 ч перед роем землетрясений 4 августа можно рассматривать как оперативный предвестник.

3. Перед роем землетрясений 4–5 августа ($M_{\max} = 5.8$, $R = 130$ км), зарегистрировано почти двукратное возрастание концентрации молекулярного водорода (25 июля – 4 августа), по сравнению со средним значением в подпочвенном воздухе на пункте ПРТ. Данная аномалия может рассматриваться как краткосрочный предвестник.

Авторы выражают благодарность Г.Н. Копыловой за дискуссии и обсуждение данной работы, что способствовало лучшему пониманию проблемы, рассмотренной в статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 02-05-64556, Президиума РАН № 05-1-02-051 и гранта Президента Российской Федерации № МК-3295.2004.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтов Г.И.* К проблеме водородного дыхания Земли // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы международной конференции памяти академика П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС, 2002. С. 24–30.
2. *Грамаков А.Г.* Эманионный метод поисков, исследования и разведки радиоактивных объектов // Тр. ЦНИГРИ: Вып.7. Л.: 1934. 115 с.
3. *Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Швицов Б.М.* Анализ изменений геоакустической эмиссии в процессе подготовки сильных землетрясений на Камчатке // ЭЖ “Исследовано в России”. 2004. 262. С. 2809–2819. (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/262.pdf>).
4. *Кочерян Г.Г., Павлов Д.В., Кулюкин А.А.* Малые возмущения и реология массива скальных пород // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. М.: Наука, 2003. С. 21–31.
5. *Любушин А.А.* (мл). Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103–108.
6. *Любушин А.А.* (мл). Агрегированный сигнал систем низкочастотного геофизического мониторинга // Физика Земли. 1998. № 1. С. 69–74.
7. *Моргунов В.А.* Крип горных пород на завершающей стадии подготовки землетрясений // Физика Земли. 2001. № 4. С. 3–11.
8. *Николаев В.А.* Трековый метод в радоновых измерениях // Аппаратура и новости радиационных измерений. 1998. № 2. С. 16–27.
9. *Новиков Г.Ф.* Радиометрическая разведка. Л.: Недра, 1989. 406 с.
10. *Ризниченко Ю.В.* Расчет скорости деформаций при сейсмическом течении горных масс // Физика Земли. 1977. № 10. С. 34–47.
11. *Рудаков В.П.* Сейсмоэманационные эффекты геологических структур // Проблемы геофизики XXI в.. Книга 2. М.: Наука, 2003. С. 95–113.

12. Рыжакова Н.К., Яковлева В.С. Патент РФ № 2212688 от 20.09.2003. Способ определения плотности потока радона с поверхности земли.
13. Сержников А.И., Зимин В.М. Геологическое строение Паратунского геотермального района, влияние отдельных геологических факторов на современную геотермальную деятельность // Гидротермальные системы и термальные поля на Камчатке. Владивосток: 1976. С. 115–142.
14. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997–1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 1–11.
15. Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26–41.
16. Уломов В.И., Маваиев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Докл. АН СССР. 1967. Т. 176. № 2. С. 319–329.
17. Уткин В.И. Радон и проблема тектонических землетрясений // СОЖ. 2000. Т. 6. № 12. С. 64–70.
18. Djefal S., Allab M., Cherouayi D. E. et al. Further investigation on radon emanation along seismic faults in northern Algeria // Nucl. Geophys. 1994. V. 8. № 6. P. 583–591.
19. Dubinchuk V.T. Radon as a precursor of earthquakes // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P. 37–42.
20. King C.-Y. Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes // JGR. 1980. V. 85. P. 3065–3078.
21. King C.-Y. Gas-geochemical approaches to earthquake prediction // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P. 22–36.
22. Kim I.S., Ahhleby A., Sigel Jr. G.H. Observation of the trapping of radioactive inert gas radon on oxide glass surfaces: Macroporous scintillating-glass-fiber bundle alpha detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Res. A390. 1997. P. 419–422.
23. Holub R.F., Brady B.T. The effect of stress on radon emanation // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 1776–1784.
24. Mogro-Campero A., Fleischer R.L., Likes R.S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. №. B6. P. 3053–3057.
25. Steinitz G., Vulkan U., Lang B. Radon flux at the north-western segment of the Dead sea (Dead sea rift) and its relation to earthquakes // Israel J. of Earth Sciences. 1999. V. 48. P. 283–299.
26. Steinitz G., Begin Z.B., Gazit-Yaari N. Statistically significant relation between radon flux and weak earthquakes in the Dead Sea rift valley // Geology. 2003. №. 6. P. 505–508.
27. Virk H.S., Baljinder S. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena // Tectonophysics. 1993. V. 227. P. 215–224.
28. Wakita H. Thermal and Hydrological signatures related to seismic events in Japan // Short term thermal and hydrological signatures related to tectonic activities. Workshop Walferdange 15–17 Nov. 1995. P. 49–64.
29. Zhang W., Shi Y., Zhang P. A New Study Item of Earthquake Precursors: The Escaping Gas Rn in Groundwater // Earthquakes Research in China 1994. V. 8. № 1. P. 123–127.

On the Relationship of the Time Variation of Subsurface Radon (^{222}Rn) and Hydrogen to Seismicity in Kamchatka in July–August 2004

P. P. Firstov¹, V. A. Shirokov¹, O. P. Rulenko¹, V. S. Yakovleva², A. V. Isaev², O. P. Malysheva¹

¹ Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division,
Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia

² Tomsk Polytechnical University, Tomsk, 634034, Russia

The variation in the volumetric concentrations of radon and molecular hydrogen in subsurface air at stations of the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic test site was compared with Kamchatka seismicity. An analysis of the relation between the seismicity of the region and radon flux density variation showed that the anomalous variations in radon mass transport were due to seismicity changes both in the region as a whole and in the subduction zone area the site includes. The arrival times of radon anomalies were used to calculate the arrival azimuths of “strain waves” which are identical with the directions toward the earthquake epicenters. The recorded geochemical anomalies are probably of deformational origin and resulted from “quasi-viscous” lithosphere flow during rearrangements of the tectonic stress field in the subduction zone. The hydrogen concentration shows a short-term (advance time of $T < 14$ days) precursor of the August 4–5, 2005 earthquake swarm with the greatest magnitude $M_{\text{max}} = 5.8$ and epicentral distances of about 130 km from the recording station.