

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВЫХ АНОМАЛИЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПОДПОЧВЕННОМ РАДОНЕ НА ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

Фирстов П.П., Макаров Е.О.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,
firstov@emsd.ru*

Введение

Так как в геохимических исследованиях с целью прогноза землетрясений наиболее технологичным методом является регистрация R_n , то поиски связи между его содержанием в подпочвенном воздухе или растворенном в подземных водах и изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды перед землетрясениями, усиленно ведутся во всех сейсмоактивных регионах Земли, начиная с 70-х годов XX века. После некоторого спада интереса к этому методу, с середины 80-х годов наблюдался новый всплеск работ, связанных с изучением сейсмоманационных эффектов геологических структур во многих регионах мира [1, 7, 10, 11, 17, 20, 22, 23, 25, 26, 27]. Перспективность сейсмоманационного метода с целью прогноза землетрясений показана в многочисленных работах, ссылки на которые можно найти в обзорных работах [3, 18, 19].

В работе приведены примеры радоновых аномалий в поле подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне и выявлены некоторые особенности зависимостей параметров радоновых предвестников от магнитуды землетрясений.

Радоновые предвестники землетрясений

В работе [16] по данным за десятилетний период наблюдений на территории КНР выделены 4 типа радоновых предвестников с различными временами упреждения: долгосрочные (несколько лет), среднесрочные (около года), краткосрочные (2-6 месяцев), оперативные (часы-сутки). Следует отметить, что впервые радоновый предвестник был зарегистрирован в Японии в подпочвенном воздухе разломной зоны перед землетрясением Тонанкай (Tonankai) 12.12.1944 г. с $M=8$. [21]. В последние десятилетия прошлого века, работы по поиску предвестников в радоновом поле в Японии приобрели масштабный характер.

В работе [3] сделан анализ 83 известных на то время радоновых предвестников, зарегистрированных в различных сейсмоактивных районах мира к концу 80^х годов прошлого века. Обращено внимание на их временные формы и найдены эмпирические зависимости между параметрами предвестниковых аномалий (амплитуда, время упреждения) и параметрами землетрясений (магнитуда, расстояние).

В обзорной работе, выполненной позже [19], обращается внимание на особенности радоновых аномалий и сделана попытка объяснения их физической природы. Также отмечается, что радоновые предвестники имеют большое многообразие форм различной длительности, и они регистрируются на значительных расстояниях от эпицентров, как мелких, так и глубоких землетрясений с диапазоном магнитуд $M=4-8$. По мнению автора [19], наблюдаемые аномалии R_n возникают в результате деформаций ($10^{-6}-10^{-8}$), связанных с изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды в пункте наблюдения.

Рассмотрим несколько примеров радоновых предвестников в поле подпочвенного R_n , зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. В качестве примера отклика подпочвенного R_n на землетрясения Авачинского залива рассмотрим динамику $OA R_n$ на сети пунктов в период 3-7 августа 2004 г., когда в районе Авачинского залива произошел рой землетрясений с двумя наиболее сильными событиями с $M = 5.6$. На трех пунктах (ИКР, ИНС, ЛВЧ), расположение которых на Камчатке показано на рис. 1, с 3 по 5 августа выделяются аномалии длительностью около 1.5 суток. Причем для станций ЛВЧ и ИНС, расположенных в зоне динамического влияния Петропавловск-Малкинского разлома, они начинаются со ступенчатого уменьшения сигнала с относительной амплитудой аномалии $\delta \approx -20\%$, а на станции ИКР, расположенной в Паратунском грабене, аномалия начинается с плавного увеличения $OA R_n$ $\delta \approx 20\%$.

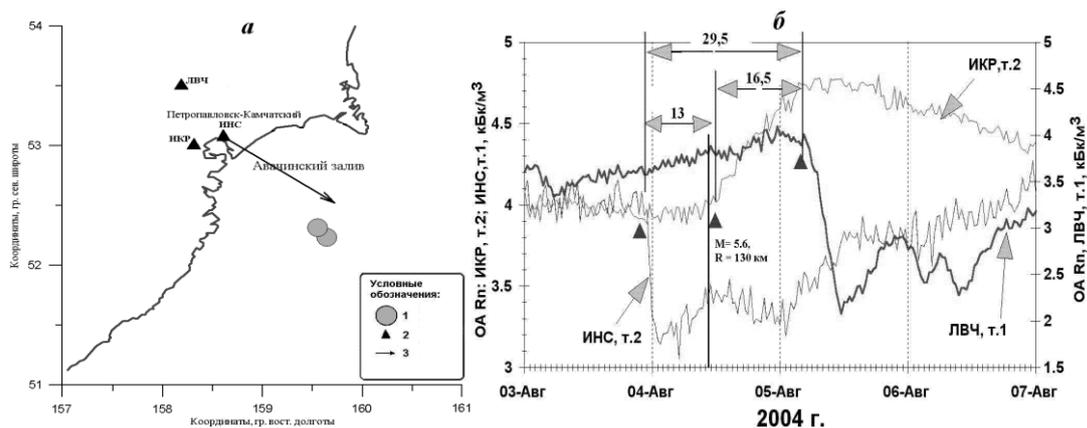


Рис. 1. Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга в 2004 г. и эпицентров наиболее сильных землетрясений роевой последовательности (а), исходные данные регистрации ОА Rn на трех пунктах за 3-6 августа 2004 г. (б). 1 – эпицентры землетрясений с $M=5.6$; 2 – пункты наблюдений, работавшие в 2004 г.; 3 – азимут на источник «геодеформационной» волны [14].

По разности моментов возникновения выделенных переломов в динамике ОА Rn рассчитывался азимут на источник возмущения, который с точностью до 15° совпал с направлениями на эпицентры наиболее сильных двух землетрясений роя. Предположительно, таким источником могла быть «геодеформационная волна» с кажущейся скоростью распространения около ~ 30 км/сутки. Данный случай демонстрирует, что отклик в поле подпочвенного радона на геодеформационные процессы перед землетрясением во многом определяется геолого-тектоническими условиями и литологическим составом приповерхностных отложений пункта регистрации.

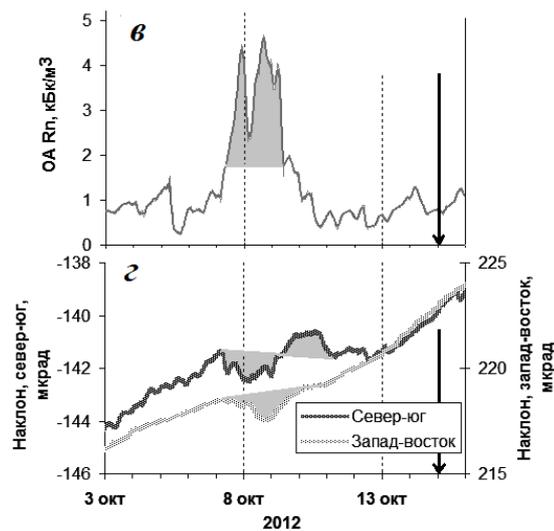


Рис. 2. Динамика ОА Rn (а) и кривые наклонов двух составляющих перед землетрясением с $M=5.6$ (б) [5].

Возникновение краткосрочных предвестниковых аномалий в поле подпочвенного Rn, как правило, связывают с изменением напряженно-деформированного состояния геосреды в пункте регистрации. Это хорошо иллюстрирует аномалия с $t_{упр} = 8$ суток и длительностью около трех суток, зарегистрированная перед землетрясением с $M=5.6$, произошедшим 15 октября 2012 г. в зоне субдукции в 140 км от пункта регистрации, и коррелирующая с деформацией земной поверхности на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (Рис. 2). Синхронно с радоновой аномалией, наклономерной станцией была зарегистрирована деформация земной поверхности, по форме представляющая уединенную

волну длительностью ~ 4 суток. Максимальная относительная деформация грунта оценивается $2 \cdot 10^{-6}$ [5, 14].

Вблизи северо-восточного побережья о. Хонсю (Япония) 11 марта 2011 г. произошло землетрясение Тохоку с $M=9.0$. В центральной части полуострова Идзу на расстоянии 490 км от эпицентра проводились измерения Rn в водах артезианской скважины глубиной 350 м. За 4.5 месяца началось возрастание ОА Rn, которое достигло в момент землетрясения $\approx 200\%$ относительно фона, а в июле она упала до фона. Общая продолжительность аномалии 8 месяцев [24]. В поле подпочвенного Rn на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне перед этим мегаземлетрясением зарегистрировались как среднесрочная, так и долгосрочная аномалии (рис. 3, 4). Бухтообразная среднесрочная аномалия длительностью 12 суток была зарегистрирована в пункте ИНС, где регистрация Rn ведется четырьмя газоразрядными счетчиками: на поверхности пола бункера, глубиной 2.5 м; в зоне аэрации, на глубине 1 м от пола бункера; в воздухе бункера; в обсадной трубе скважины. На всех датчиках четко выделяется аномалия с $t_{упр} = 28$ суток, которая рассматривается авторами как предвестник мегаземлетрясения Тохоку с $M=9.0$ (рис. 3) [4, 15].

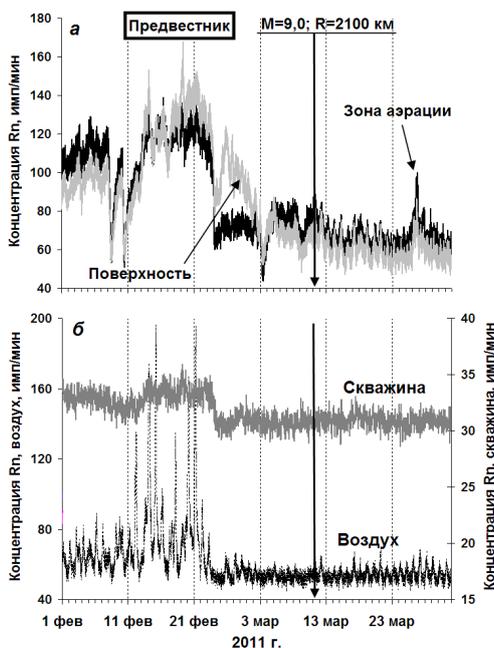


Рис. 3. Динамика концентрации R_n на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне за период февраль - апрель 2011 г. в пункте ИНС: *a* – концентрация R_n в зоне аэрации и с поверхности пола бункера; *b* – концентрация R_n в воздухе бункера и в стволе скважины. Подробное описание системы наблюдений пункта ИНС дано в работе [4].

Долгосрочные тренды в динамике подпочвенного R_n в пункте ПРТ наблюдались перед цепочкой сильных землетрясений северо-западного обрамления Тихого океана и мегаземлетрясением Тохоку. Тренд роста значений ОА R_n в пункте ПРТ перед мегаземлетрясением начался в марте 2010 г. и продолжался 8 месяцев до января 2011 г. (рис. 4). Перед цепочкой землетрясений с $M > 7.5$ Курило-Камчатской островной дуги наблюдался устойчивый тренд роста ОА подпочвенного R_n длительностью более двух лет с последующим резким падением непосредственно перед событиями. В настоящее время также наблюдается тренд, который авторы рассматривают как долгосрочный предвестник землетрясения с $M > 7.5$ в районе южная

Камчатка – северные острова Курильской гряды [12].

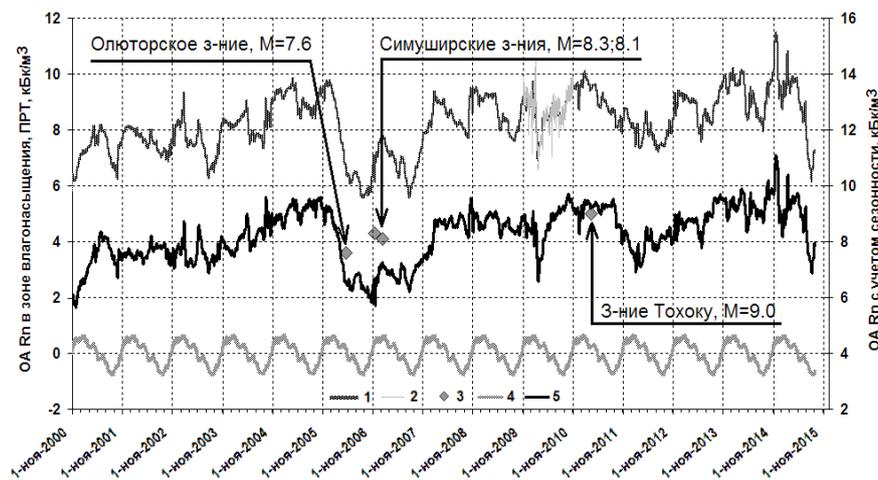


Рис. 4. Временной ряд ОА R_n в зоне влагонасыщения (глубина 3.5 м) в опорном пункте ПРТ, осредненный скользящим средним в пяти суточном окне, аддитивная сезонная модель и кривая за вычетом сезонной составляющей. 1 – осредненные данные, 2 – исходные данные, 3 – землетрясения северо-западного обрамления Тихого океана с $M > 7.5$, 4 – аддитивная сезонная модель, 5 – кривая ОА R_n за вычетом сезонной составляющей [12].

Связь параметров предвестниковых аномалий с характеристиками землетрясений

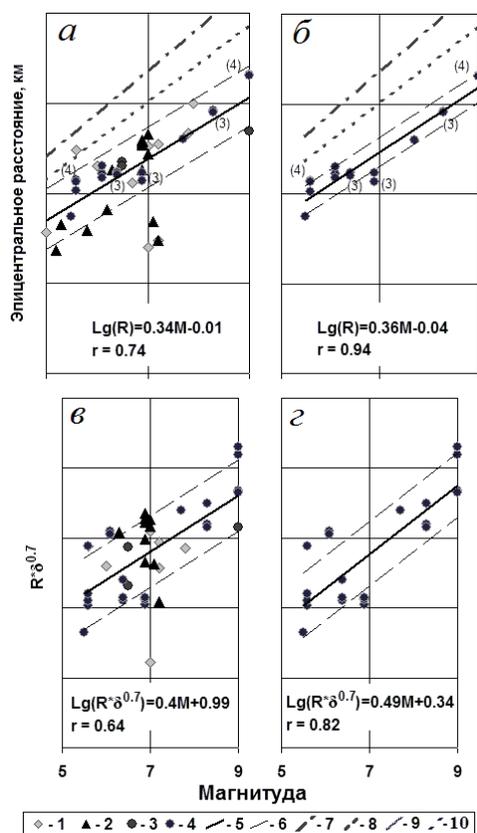
Под временем упреждения ($t_{упр}$) понимается время между моментом возникновения предвестника и событием. Этот термин является эквивалентом термина «длительность предвестника», использовавшегося в работах конца прошлого века [2, 8]. Обычно термин «время упреждения» определяется как промежуток времени от настоящего в будущее, на который разрабатывается прогноз [6], но в реальном времени прогноз можно сделать только после того как предвестник сформировался. Авторы сочли возможным вслед за другими исследователями использовать этот термин для интервала: начало формирования предвестника – событие.

В работе [18] анализ радоновых предвестников выполнен на более широком материале. Приводятся данные о предвестниках в радоновом поле перед землетрясениями с $M = 2.5-8$. Большинство наблюдений было проведено перед землетрясениями с $M > 4$. Относительные изменения концентрации R_n ($\delta\% = \frac{(A_{ан} - A_{фон})}{A_{фон}} \cdot 100$) чаще всего находились в пределах 20-200% от фона, но отмечены случаи превышения более чем на 1200%.

Согласно [6] принято считать, что *оперативный, краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный* прогнозы имеют время упреждения $t_{упр}$ соответственно до одного месяца, от месяца до одного года, от года до пяти лет, от пяти лет до 15 соответственно. В связи с ограниченной выборкой предвестниковых аномалий, в данной работе по времени упреждения принята следующая градация: оперативные и краткосрочные предвестники имеют время упреждения $t_{упр} \leq 10$ суток, среднесрочные $10 < t_{упр} < 100$ суток, а долгосрочные $t_{упр} > 100$ суток.

Для изучения связей параметров предвестниковых аномалий с характеристиками землетрясений в статье использованы данные из работы [18] с добавлением предвестниковых аномалий, зарегистрированных на сети станций радонового мониторинга Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона за период 1997-2015 гг. Из сводки предвестников землетрясений в различных геофизических полях [18] выбраны 67 предвестников в поле радона, которые разбиты по длительности времени упреждения.

Рассматривались следующие параметры предвестниковых аномалий: $\delta\%$ - относительная амплитуда аномалии; $t_{упр}$ - время упреждения; $t_{ан}$ - длительность аномалии. Теоретические и эмпирические зависимости параметров предвестников от магнитуды исследовались многими авторами, но в статье



не рассматриваются все публикации, посвященные этому вопросу, а делается опора на две работы, которые сегодня следует признать классическими [2, 8]. В работе [2] на основании теоретических выкладок, исходя из консолидационной модели подготовки землетрясений, показано, что проявление предвестников подчиняется зависимости $R=10^{0.43M}$. Эта зависимость очень близка к зависимости, полученной в работе [8] на основании эмпирических данных распространения относительных деформаций 10^{-8} по закону $R=10^{0.48M}$.

Рис. 5. Зависимость параметров предвестниковых аномалий от магнитуды землетрясения $\lg R = f(M)$ и $\lg R\delta^{0.7} = f(M)$: а, в – для диапазона $M = 5-9$, б, г – для предвестников, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском полигоне.

1 – оперативные и краткосрочные, 2 – среднесрочные, 3 – долгосрочные, 4 – камчатские предвестниковые аномалии; 5 – корреляционная зависимость для предвестников из табл.; 6 – стандартная ошибка расчета корреляционной зависимости для предвестников из табл.; 7 – корреляционная зависимость распространения относительных деформаций $R = 10^{0.48M}$ [8]; 8 – теоретическая зависимость зоны распространения деформационных предвестников $R=10^{0.43M}$ [2]; 9 – корреляционная зависимость зоны проявления деформационных предвестников северо-западной части Тихоокеанского пояса [8]; 10 – корреляционная зависимость зоны проявления всех предвестников Тихоокеанского сейсмического пояса [8].

Сравнение приведенных выше зависимостей с зависимостями, полученными для различных наборов предвестниковых радоновых аномалий, показано на рис. 5.

Линия регрессии корреляционной зависимости для радоновых предвестниковых аномалий землетрясений с $5 < M < 9$ (рис. 5а): $\lg(R, \text{км}) = 0.34M - 0.01$, (1)

а только предвестников, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском полигоне (рис. 5б):

$$\lg(R, \text{км}) = 0.36M - 0.04. \quad (2)$$

Они обе имеют близкий наклон, но лежат ниже зависимостей из работ [2, 8].

В работе [Сидорин, 1992] исследовалась зависимость $\lg R\epsilon^{0.7} = aM - b$ и был получен следующий результат:

$$\lg R\epsilon^{0.7} = 0.48M - 5.47, \quad (3)$$

где ϵ – относительная деформация. Для выборок предвестников землетрясений с $M = 5 - 9$ и для предвестников, зарегистрированных на Петропавловск-Камчатском полигоне были получены аналогичные зависимости δ от магнитуды (рис. 5в,г), которые могут быть записаны следующим образом:

$$\lg R\delta^{0.7} = 0.40M + 0.99 \quad (4),$$

$$\lg R\delta^{0.7} = 0.49M + 0.34 \quad (5).$$

Наклоны линий регрессии для зависимостей (4, 5) хорошо совпадают с зависимостью (3).

На рис. 6а показано корреляционное поле зависимости $\lg t_{упр} = f(t_{ан})$ которая с большим коэффициентом корреляции $r = 0.89$ может быть описано линейной зависимостью:

$$\lg t_{упр} = 0.82 \lg t_{ан} + 0.31 \quad (6)$$

С определенной долей условности на корреляционном поле можно выделить три области (рис. 6б). Для области с $t_{ан} = 0.5 - 5$ суток из 16 случаев 12 имеют $t_{ан} < t_{упр}$. В этой области предвестниковые аномалии, как правило, имеют форму ступеньки или однополярного импульса (см.

рис. 6б). Квазибухтообразные предвестники, имеющие в большинстве случаев $t_{ан} < t_{упр}$, занимают область II в диапазоне $5 \leq t_{ан} < 50$ суток. Для области III характерны длительные с $t_{ан} > 50$ суток тренды, которые часто продолжают и после события ($t_{ан} > t_{упр}$). Большой временной интервал длительности радоновых предвестников ($0.5 < t_{ан} < 1000$ суток) и выделенные три области в корреляционном поле $\lg t_{упр} = f(\lg t_{ан})$ свидетельствует о существовании нескольких возможных моделей генерации радоновых предвестников.

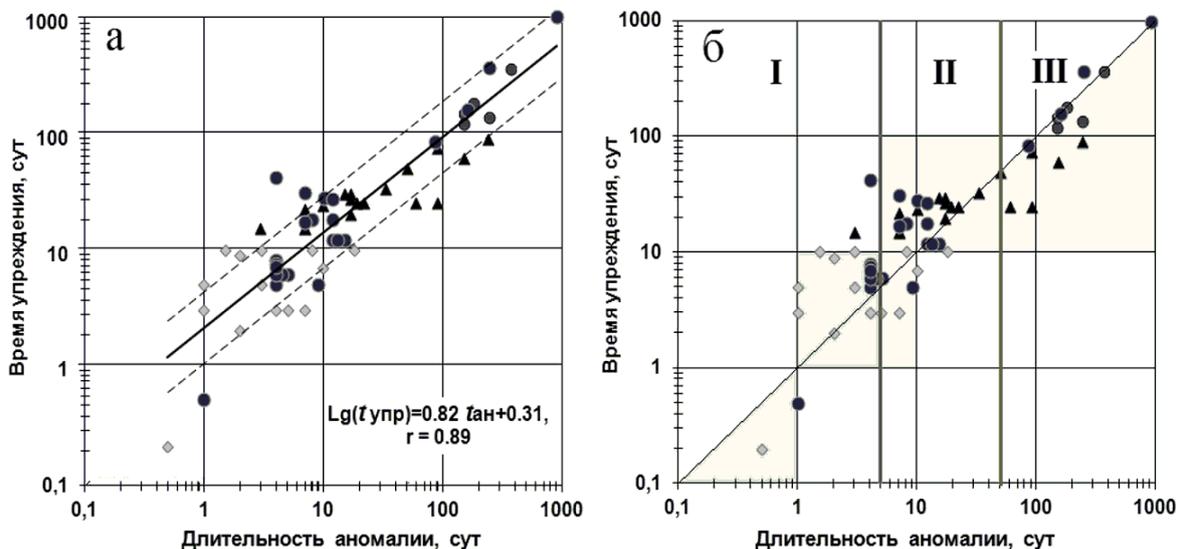


Рис. 6. Корреляционное поле логарифма времени упреждения радонового предвестника от логарифма его длительности (а), выделение отдельных областей в зависимости соотношения $\lg t_{упр} \geq \lg t_{ан}$ (б). Условные обозначения см. на рис. 5. I – область проявления импульсных и ступенчатых предвестников; II – область проявления квазибухтообразных предвестников; III – область проявления предвестников в виде тренда.

Заключение

Как было показано выше, для радоновых предвестников характерно многообразие форм различной длительности, и они регистрируются на значительных расстояниях от очагов землетрясений. Зависимость параметров предвестниковых аномалий в поле подпочвенного Rn от магнитуды землетрясения $\lg R = f(M)$, $\lg R \delta^{0.7} = f(M)$ близки к подобным зависимостям для деформационных предвестников [8], что подтверждает общепринятое мнение обусловленности радоновых предвестников деформационными процессами.

Большинство работ, в которых описываются радоновые предвестники, относятся к районам, расположенным в зонах коллизий (Средняя Азия, Китай, Кавказ) с мелкофокусной коровой сейсмичностью. В них наглядно демонстрируются возможности радонового метода для прогноза землетрясений с глубиной очага 0-30 км и регистрацией Rn вблизи эпицентральной зоны.

В целом радоновый мониторинг с целью прогноза землетрясений развивается почти во всех сейсмоактивных районах. Сейсмичность зоны субдукции района полуострова Камчатка определяется взаимодействием Евроазиатской и Тихоокеанской плит, когда эпицентры наиболее сильных землетрясений располагаются на дне Тихого океана и значительном расстоянии от пунктов регистрации. Но в то же время перед 65% землетрясений с $M > 5.5$ с эпицентрами в зоне субдукции района Авачинского залива, в поле подпочвенного Rn наблюдаются предвестники с $t_{упр} = 1-8$ суток, обусловленные возникновением «геодеформационных» волн на последней стадии подготовки землетрясений [5]. Так как относительная амплитуда аномалий в большинстве случаев составляла 20-30%, то только по данным сети пунктов радонового мониторинга с апертурой ~ 50 км их можно выделять среди большого числа помех различного вида. Краткосрочные и среднесрочные предвестниковые аномалии в поле радона наблюдались перед сильными землетрясениями с $M > 7.5$ северо-западного обрамления Тихого океана. Вероятно, механизм длительных трендов в динамике ОА Rn обусловлен изменением поля напряжений в зоне субдукции северо-западного фланга Тихого океана.

Авторы выражают огромную благодарность В.Н. Волошину, который на протяжении почти 20 лет поддерживает бесперебойное функционирование пункта радонового мониторинга «Паратунка».

Литература

1. *Авдуалиев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П.* Радоновый предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии // ДАН СССР. 1986. Т. 291. № 4. С. 924-927.
2. *Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 100 с.
3. *Зубков С.И.* Радоновые предвестники землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С.74-105.
4. *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. Т. 48. № 2. С. 5-14.
5. *Макаров Е.О., Сероветников С.С.* Предвестниковые аномалии в радоновом и деформационном полях земли перед землетрясением в Авачинском заливе с $M=5.6$, 15.10.2012 г. / XV Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сб. докладов. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2014. С. 152-155.
6. Прогностика. Терминология. (Сборник научно-нормативных терминов; Вып. 109) М.: Наука, 1990. 56 с.
7. *Рудаков В.П.* Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ// Автореферат на соискание степени доктора физико-математических наук. М. 1992 г.
8. *Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений // М.: Наука, 1992. 192 С.
9. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений // М.: Наука, 1993. 312 С.
10. *Стивак А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А.* Особенности эманации радона ^{222}Rn с глубиной // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 6. С.825-828.
11. *Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С.82-94.
12. *Фирстов П.П.* Возможности прогноза сильных землетрясений по данным радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2014. № 1. Вып. 2. С. 232-245.
13. *Фирстов П.П., Макаров О.Е., Максимов А.П., Чернев И.И.* Отражение геодинамической обстановки северо-западного обрамления Тихого океана в динамике подпочвенного радона и в газовом составе теплоносителя Мутновской ГеоЭС // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 22-31.
14. *Фирстов П.П., Макаров Е.О., Сероветников С.С.* Предвестниковые аномалии в радоновом и деформационном полях земли перед землетрясением в Авачинском заливе с $M=5.6$, 15.10.2012 г. // Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 191-197.
15. *Широков В.А., Фирстов П.П., Макаров Е.О., Степанов И.И., Степанов В.И.* Возможный подход к краткосрочному и долгосрочному прогнозу сильнейших землетрясений на примере Тохоку (Япония) 11 марта 2011 г., $M_w=9.0$ // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 4. С. 5-22.
16. *Chang Wei, Lin Y.-Y.* Preliminary study on the application of hydrogeochemistry of earthquake prediction / Contrib. Pap. Intern. Symp. on earthquake prediction. UNESCO. Paris. 2-6 Apr. 1979 / Conf 801. Col. 14/111-8. Paris. 1979. P.1-14.
17. *Chaudhuri H., Ghose D., Bhandari R. K., Sen P., Sinha B.* The enigma of helium / Acta geod. et geophys. hung. - 2010. - 45, № 4. - С. 452-470.
18. *Cicerone R.D., Ebel J.E., Beittton J.* A systematic compilation of earthquake precursors // Tectonophysics. 2009. N 476. P.371-396.
19. *Dubinchuk V.T.* Radon as a precursor of earthquakes / Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. / Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, 9-12 September 1991, Vienna. P. 6-22.
20. *Firstov P.P., Yakovleva V.S., Shirokov V.A. et al.* The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril-Kamchatka subduction zone // Ann. Geophys. 2007. V. 50, N 4. P.546-557.
21. *Hatuda, Z.* Radon content and its change in soil air near the ground surface, Mem. Col. Sci. Univ. Kyoto, Ser. B, 20, 1953. P.285-306.
22. *Ramola R. C., Prasad Yogesh, Prasad Ganesh, Kumar Sushil, Choubey V. M.* Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya // Appl. Radiat. and Isotop.: International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. 2008. 66, № 10. - С. 1523-1530.
23. *Steinitz G., Begin Z.B., Gazit-Yaari N.* A statistically significant relation between radon flux and weak earthquakes in the Dead Sea Rift Valley // Geology. 2003. V. 31. P.505-508.
24. *Tsunomori F., Tanaka H., Murakami M., Tasaka S.* Seismic Response of Dissolved Gas in Groundwater. / Proceedings of the 10th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction. October 25, 2011 National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. P. 29-35.
25. *Virk H.S., Sharma A.K., Walia V.* Correlation of alpha-logger radon data with microseismicity in N-W Himalaya // Curr. Sci. 72 (9), 1997. P. 656-663.
26. *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.
27. *Zhan 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. 39-47.