

Посвящается светлой памяти Валерия Петровича Рудакова

УДК 550.348

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАНЫМ РАДОНОВОГО МОНИТОРИНГА НА ПЕТРОПАВЛОВСК- КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

© 2014 П.П. Фирстов

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: firstov@emsd.ru*

Рассмотрены результаты мониторинга почвенного радона в рыхлых отложениях на сети пунктов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона и основы радонового метода краткосрочного прогноза сильных землетрясений с $M > 5.5$ южной Камчатки. На основании анализа динамики сезонной составляющей объемной активности радона в зоне насыщения за период 2000–2013 гг., по данным опорного пункта «Паратунка» сделан среднесрочный прогноз сильного землетрясения с $M > 7.5$ на осенне-зимний период 2014 г. в районе южной Камчатки и северных Курил.

Ключевые слова: Камчатка, почвенный радон, сейсмичность, прогноз землетрясений.

ВВЕДЕНИЕ

Поиски связи между содержанием радона (^{222}Rn) в почвенном воздухе и изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды на последней стадии подготовки сильных землетрясений усиленно проводятся в течение последних тридцати лет во всех сейсмоактивных регионах Земли. Перспективность сейсмоэманационного метода для мониторинга геодинамических процессов, в частности прогноза землетрясений и горных ударов, показана в ряде работ (Абдувалиев и др., 1986; Рудаков, 1992, 2012; Спивак и др., 2008; Уткин, Юрков, 1997; Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2011; Firstov et al., 2007; Steinitz et al., 2003).

В районе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона под руководством автора в 1997–2001 гг. была создана сеть пунктов мониторинга объемной активности радона (ОА Rn) в почвенном воздухе. В районе Паратунской геотермальной системы в долине ручья Коркино находится опорный пункт сети (ПРТ), а остальные пункты располагаются в различных геоструктурных элементах полигона (рис. 1). Описание расположения пунктов и применяемой аппаратуры

приведено в работах (Макаров и др., 2012; Фирстов, 1999; Фирстов и др., 2003; Фирстов, Рудаков, 2003; Фирстов и др., 2013; Firstov et al., 2007).

В качестве датчиков на всех пунктах используются газоразрядные счетчики типа СБМ-19, что позволяет вести пассивную регистрацию ^{222}Rn по β -излучению продуктов его распада (Рудаков, 1992). Датчики располагаются в заборных емкостях (ведро объемом 10 л), как правило, на двух глубинах зоны аэрации, а в опорном пункте ПРТ и в зоне насыщения (рис. 1). Достижение равновесия между Rn и его продуктами распада в заборной емкости повышает чувствительность измерений.

С начала организации сети регистрация велась с помощью радиометров РЕВАР. В настоящее время пункты сети оснащаются автоматизированными комплексами регистрации концентрации почвенных газов (РКПГ) на базе современных регистрирующих приборов серии АЛМЕМО, которые оборудованы системой коннекторов. Интеллектуальные коннекторы обеспечивают подключение любых датчиков, так как параметры входного сигнала находятся в запоминающем устройстве коннектора, где и производится его оцифровка. Одновременно со

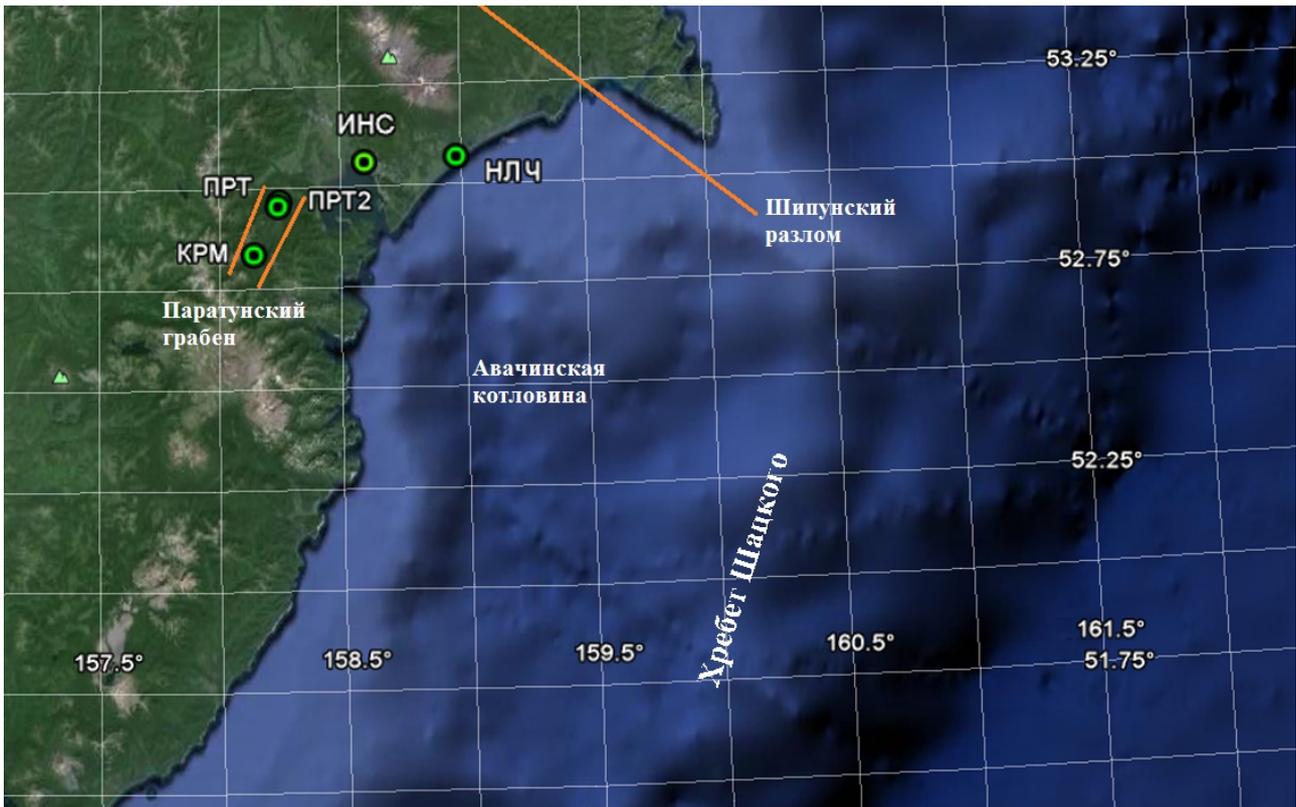


Рис. 1. Схема размещения пунктов регистрации концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в 2013 г. и некоторые структурные элементы района: НЛЧ – Налычево; ИНС – пункт на базе скважины ИНС-1 вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН; ПРТ – опорный пункт, долина ручья Коркина, пос. Паратунка; ПРТ2 – геотермальный стационар ИВиС ДВО РАН в пос. Паратунка; КРМ – Карымшинский стационар ИВиС ДВО РАН.

счетом импульсов с газоразрядных датчиков, регистрируются метеорологические величины (температура и давление) и концентрация других почвенных газов. Для формирования импульсов, получаемых с газоразрядных счетчиков СБМ-19, был сконструирован и изготовлен в Камчатском филиале (КФ) ГС РАН формирователь импульсов, после которого импульсы подаются на коннекторы измерительного устройства (Макаров и др., 2012). Переход от концентрации к объемной активности осуществляется по эмпирической формуле: $OA R_n (\text{Бк}/\text{м}^3) = 9 \cdot N (\text{имп}/\text{мин})$.

РЕАКЦИИ ПОЛЯ ПОЧВЕННОГО РАДОНА В ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЯХ НА ВАРИАЦИИ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Согласно работам (Рудаков, 1992, 2012; Фирстов, Рудаков, 2003) тектонические нарушения (разломы, трещины разного порядка) могут рассматриваться как флюидонасыщенные коллекторы, являющиеся местом разгрузки подземных водоносных горизонтов. При этом для поисков гидрогеохимических предвестников представляет интерес не только зона нарушения

(разлом), но и вся зона его динамического влияния (ЗДВР), под которой подразумевается вся область, связанная с формированием и развитием разлома. По вертикали в ЗДВР выделяются: зона аэрации и зона насыщения, под которой подразумевается суммарная мощность гидравлически связанных водоносных горизонтов в разломе. Данная модель ЗДРВ, определяющая динамику эманационного поля, получила экспериментальное подтверждение, как в лабораторных, так и в натуральных экспериментах (Рудаков, 1992, 2009). Теоретически показано, что реакцией зоны насыщения тектонического нарушения на изменения напряженно-деформированного состояния земной коры будет изменение уровня поверхности открытого водоносного горизонта, которое функционально зависит от вариаций атмосферного давления. Исходя из сказанного, динамика поля R_n в зоне аэрации (почвенный радон), в основном, определяется метеорологическими факторами, но изменение напряженно-деформированного состояния среды также может найти отражение в динамике радона (рис. 2а).

Проанализируем параметры дифференциального уравнения массопереноса подпочвенного радона с позиции динамики среды. Классическая теория эманационного метода

а

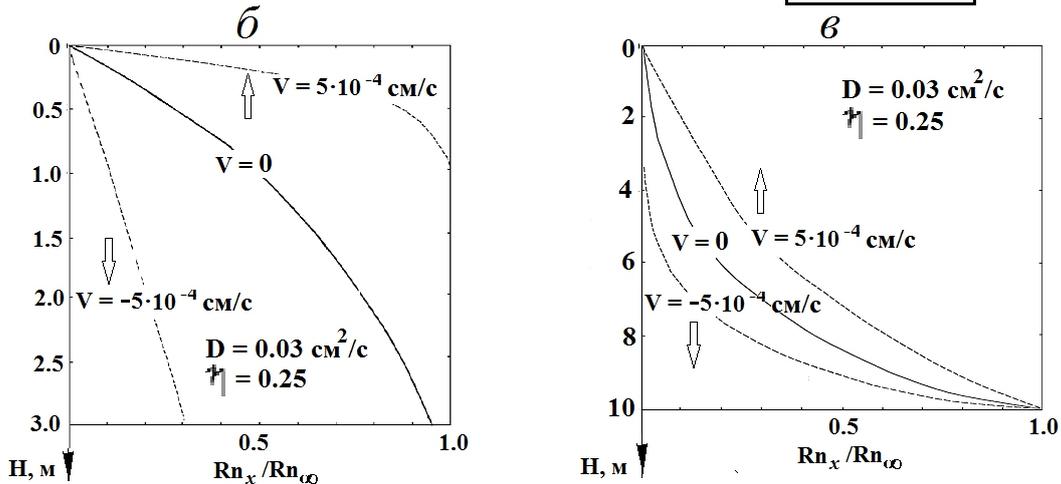


Рис. 2. Блок-схема причинно-следственных связей массопереноса Rn в зоне динамического влияния разлома (а); распределение концентрации Rn в рыхлых однородных отложениях зоны аэрации (б) и в рыхлых отложениях перекрывающих пласт радиесодержащей породы, находящейся на глубине 10 м (в) при различных скоростях конвективного потока.

рассматривает массоперенос радона в рыхлых отложениях как некий установившийся диффузионно-конвективный процесс, который описывается следующим уравнением (Новиков, 1989):

$$\eta \frac{dRn}{dt} = D \frac{d^2 Rn}{dx^2} + v\eta \frac{dRn}{dx} - \eta Rn\lambda + Q,$$

где Rn – концентрация радона в единице объема порового пространства, Ки/см³; η – коэффициент пористости среды; D – коэффициент диффузии, см²/с; λ – постоянная распада эманаций, с⁻¹; v – скорость конвективного переноса,

см/с; $Q = \frac{a \cdot Ra \cdot \rho \cdot \lambda}{\eta}$ скорость выделения эманаций в поровое пространство в единице объема среды, Ки/с/см³; Ra – количество радия в породе, г; ρ – плотность породы, г/см³; a – коэффициент эманирования.

Если при проведении площадного эманационного картирования параметры D , v и Q , как правило, принимаются постоянными константами и зависят от петрологических особенностей породы (Новиков, 1989), то в зоне аэрации ЗДВР

на длительных интервалах времени они могут изменяться под действием метеорологических факторов и геодинамических процессов.

Коэффициент диффузии (D) функционально зависит от влажности и температуры рыхлых отложений. Суточные и особенно сезонные колебания температуры приземного слоя атмосферы определяют соответствующую цикличность колебаний температуры верхнего слоя поверхности.

Существенное влияние на скорость диффузии оказывает влажность. При увеличении влажности скорость диффузии резко уменьшается и при полном увлажнении диффузия практически прекращается.

Скорость конвективного переноса (v) обусловлена движением газовых потоков под действием перепада давления, который определяется атмосферным давлением и уровнем открытой поверхности зоны насыщения. По данным (Рудаков, 1992) скорость конвективного переноса в проницаемых тектонических нарушениях, связанная с «падением» уровня открытой поверхности зоны насыщения («засасыванием»), меняется в пределах $(1.5-6.2) \cdot 10^{-6}$ м/с (13-54 см/сутки).

Скорость радоновыделения (Q) зависит от содержания в породах радия, их плотности и пористости, а также от их эманлирующей способности (коэффициента эманирования). Временная изменчивость скорости радоновыделения прежде всего определяется коэффициентом эманирования и пористостью отложений. Объем порового пространства и выход в него эманаций существенно зависят от влажности рыхлых отложений. Также эманлирующая способность радиоактивных составляющих рыхлых отложений зависит от температуры, что определяет сезонные вариации в поле подпочвенного радона.

Величина аномального эффекта (амплитуда и длительность аномалии) находятся в определенной зависимости, как от гидродинамических свойств среды, так и от условий формирования эманационного поля в рыхлых отложениях горных пород, обусловленных, прежде всего, характером распределения в них радийсодержащих минералов. Из достаточно большого числа моделей миграции радона в рыхлых отложениях, две достаточно близко описывают параметры аномалий эманационного поля, связанных с проявлением геодинамических процессов (Рудаков, 1992, 2009; Фирстов, Рудаков, 2003):

1 – модель с распределенными параметрами – перенос почвенного Rn происходит в условиях рыхлых отложений с однородным кларковым содержанием радиоактивных элементов;

2 – модель с сосредоточенными параметрами – перенос эманаций осуществляется через слой отложений от обогащенного радием рудного пласта, либо водоносного слоя высокоминерализованных радоновых вод.

Рассчитывались кривые зависимости распределения концентрации Rn в верхней части рыхлых отложений от глубины для обеих моделей (рис. 2б, в). На кривых показано, что при возникновении конвективного потока, принудительно воздействующего на перенос эманаций в сторону «дневной поверхности», в первой модели аномальное значение концентрации Rn на глубине режимных измерений (1-2 м) не может превысить в 3-4 раза величину фонового уровня. Во время как во второй модели аномальное значение концентрации эманаций, в зависимости от содержания Ra и глубины залегания «рудного тела», может в десятки раз и более превысить фоновый уровень. В первой модели увеличение концентрации эманаций с глубиной происходит экспоненциально и, в зависимости от коэффициента диффузии и скорости конвективного потока, выходит на асимптоту на глубинах 2-7 м.

Во второй модели увеличение концентрации Rn с глубиной следует гиперболическому синусу и стремится к максимальным значениям, равным концентрации на «подошве» неактивного слоя

мощностью, перекрывающего рудный пласт или выходы высокоминерализованных радоновых вод, значения концентрации Rn в которых на несколько порядков превосходит значение в зоне аэрации на глубине 1-2 м.

Анализ причины нестационарности процесса миграции Rn в зоне аэрации тектонических нарушений показывает, что она связана с направленным движением потока подпочвенных флюидов. Поэтому в зависимости от типа рассматриваемой модели, то есть в зависимости от типа распределения концентрации эманаций с глубиной рыхлых отложений, характера и скорости конвективного потока будет формироваться динамика поля подпочвенного Rn . При создании сети пунктов регистрации Rn на Петропавловск-Камчатском полигоне этот фактор в той или иной мере учитывался. Пункты организовывались в ЗДВР, которые, как правило, трассировались речными долинами. Опорный пункт ПРТ в долине ручья Коркина расположен в районе геотермального резервуара, для принятых параметров и для него характерна зависимость распределения концентрации Rn от глубины по схеме рис. 2в.

В последнее время был выполнен ряд теоретических работ по математическому моделированию процесса миграции Rn с целью выяснения природы предвестниковых аномалий сильных землетрясений в поле почвенного Rn . При этом в модели миграции его в системе «грунт-атмосфера», грунт (элювиально-делювиальные отложения речных долин) рассматривался как пористая среда, обладающая фрактальными свойствами за счет объема и конфигурации пор в скелете твердых частиц (Паровик и др., 2007, 2008, 2010). При моделировании использовался аппарат дробного интегро-дифференцирования с дробным показателем α ($1 < \alpha < 2$), который является фрактальной характеристикой среды. Были исследованы режимы миграции Rn в случае аномальной диффузии и построены кривые изменения его концентрации с глубиной и показано, что при этом увеличивается глубина, с которой может мигрировать Rn к дневной поверхности, а это приводит к увеличению его стока в приземный слой атмосферы. В частном случае, при $\alpha = 2$, результаты моделирования согласуются с классической теорией в режиме обычной диффузии в однородной среде (Паровик и др., 2010).

СЕЙСМИЧНОСТЬ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА И ЕЕ ОТРАЖЕНИЕ В ПОЛЕ ПОЧВЕННОГО РАДОНА

Происходящие в Курило-Камчатском регионе землетрясения являются отражением временной перестройки полей сейсмостектони-

ческих напряжений, связанных с процессом взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской тектонических плит, поэтому здесь могут происходить сильные землетрясения с $M > 7$. Для г. Петропавловска-Камчатского сейсмичность Авачинского залива, на побережье которого он расположен, представляет практический интерес с точки зрения разработки краткосрочного прогноза землетрясения с целью принятия превентивных мер (Фирстов и др., 2011).

Как показано в работе (Селиверстов, 2009), эпицентральные зоны землетрясений с $M > 5.5$ района Авачинского залива приурочены к определенным структурным элементам Авачинского залива (рис. 3):

- зона I – приурочена к подводному продолжению Шипунского разлома регионального порядка;

- зона II – отражает сеймотектонические процессы в Авачинской котловине;

- зоны III и IV – связаны с тектоникой Северного и Южного блоков подводного хребта Шатского.

За 1999-2010 гг. в Авачинском заливе произошло 7 землетрясений с $M > 5.5$ (рис. 3), основные характеристики которых приведены в табл. 1. Из них четыре имели предвестниковые аномалии, что позволяет говорить о возможности прогноза землетрясений с вероятностью ~ 0.6 .

В качестве примеров рассмотрим:

- роевую последовательность землетрясений 4-5 августа 2004 г., произошедшую в Авачинской котловине с двумя землетрясениями с $M = 5.6$ на $R = 130$ км от опорного пункта ПРТ (рис. 4а);

- землетрясение, произошедшее 15 октября 2012 г. в Авачинском заливе на расстоянии 140 км от опорного пункта ПРТ, с глубиной очага $H = 21$ км и $M = 5.6$ (рис. 4б).

Первое наиболее сильное событие с $M = 5.6$ роя 4-5 августа 2004 г., ощущалось в г. Петропавловске-Камчатском в 2-3 балла. В динамике $OA Rn$ на всех работающих пунктах в период 3-5 августа выделяются аномалии с амплитудой 15-25% от фона. Достаточно четко выделяются

моменты переломов в динамике $OA Rn$ на трех пунктах ИКР, ИНС, ЛВЧ (рис. 5). В ближайшем от эпицентра пункте регистрации ИНС, предвестниковая аномалия появилась за 22 часа в виде резкого сброса на 25% на кривой $OA Rn$. Близкая по динамическим характеристикам аномалия зарегистрирована и в пункте ЛВЧ, которая появилась уже спустя ~ 12 часов после события и не может считаться предвестниковой. Оба пункта расположены в зоне Петропавловского горста. На станции ИКР, расположенной в Паратунском грабене, предвестниковая аномалия выразилась в плавном увеличении $OA Rn$ около 20% (Фирстов и др., 2011).

С целью выделения вступлений аномалий на каждом пункте и определения времени их запаздывания относительно пункта ИНС, в котором аномалия была зарегистрирована раньше, чем в других пунктах, выполнялась барокомпенсация на флуктуации атмосферного давления и фильтрация суточных колебаний, обусловленных суточным ходом температуры по методике А.А. Любушина (1993). По максимуму коэффициента кросс-корреляции между временными рядами пунктов, образующих треугольник с апертурой ~ 45 км, определялась разность вступлений предвестниковых аномалий, как это делалось ранее (Фирстов и др., 2004, 2011).

По разности моментов прихода выделенных вступлений рассчитывался азимут на источник возмущения, который с точностью до 15° совпадает с направлениями на эпицентры наиболее сильных землетрясений роя (рис. 4а). При допущении плоского фронта возмущения кажущаяся скорость его распространения составляет ~ 30 км/сут. По-видимому, таким возмущением могла быть «геодеформационная волна».

Перед землетрясением 15 октября 2012 г. в динамике $OA Rn$ в период с 7 по 11 октября на всех пунктах выделяются положительные бухтообразные возмущения, свидетельствующие об увеличении $OA Rn$ (рис. 6). С целью выявления общих элементов поведения в динамике $OA Rn$ на основе шести временных рядов рассчитан

Таблица 1. Основные параметры землетрясений с $M > 5.5$, произошедшие в Авачинском заливе в 1999-2010 гг.

№	Дата	Время, чч:мм:сс	Координаты		M	H, км	Область	г, км	Предвестник
			φ	λ					
1	08.03.1999	12:25:48	52.056	159.520	6.9	56	II	133.0	+
2	08.10.2001	18:14:26	52.591	160.324	6.5	48	III	146.1	-
3	08.05.2002	4:12:49	52.300	160.182	5.5	44	III	150.5	-
4	15.03.2003	19:41:28	52.249	160.387	6.1	30	III	166.2	+
5	04.08.2004	21:15:15	52.315	159.563	5.6	36	II	115.0	+
6	26.07.2005	12:17:14	52.870	160.100	5.8	27	I	125.0	-
7	30.07.2010	3:56:13	52.500	159.840	6.3	23	II	120.0	+

Примечание: φ – широта, гр. с. ш.; λ – долгота, гр. в. д.; M – магнитуда по данным NEIC (National Earthquake Information Center); H – глубина очага землетрясения; Δ – расстояние от эпицентра до опорного пункта ПРТ.

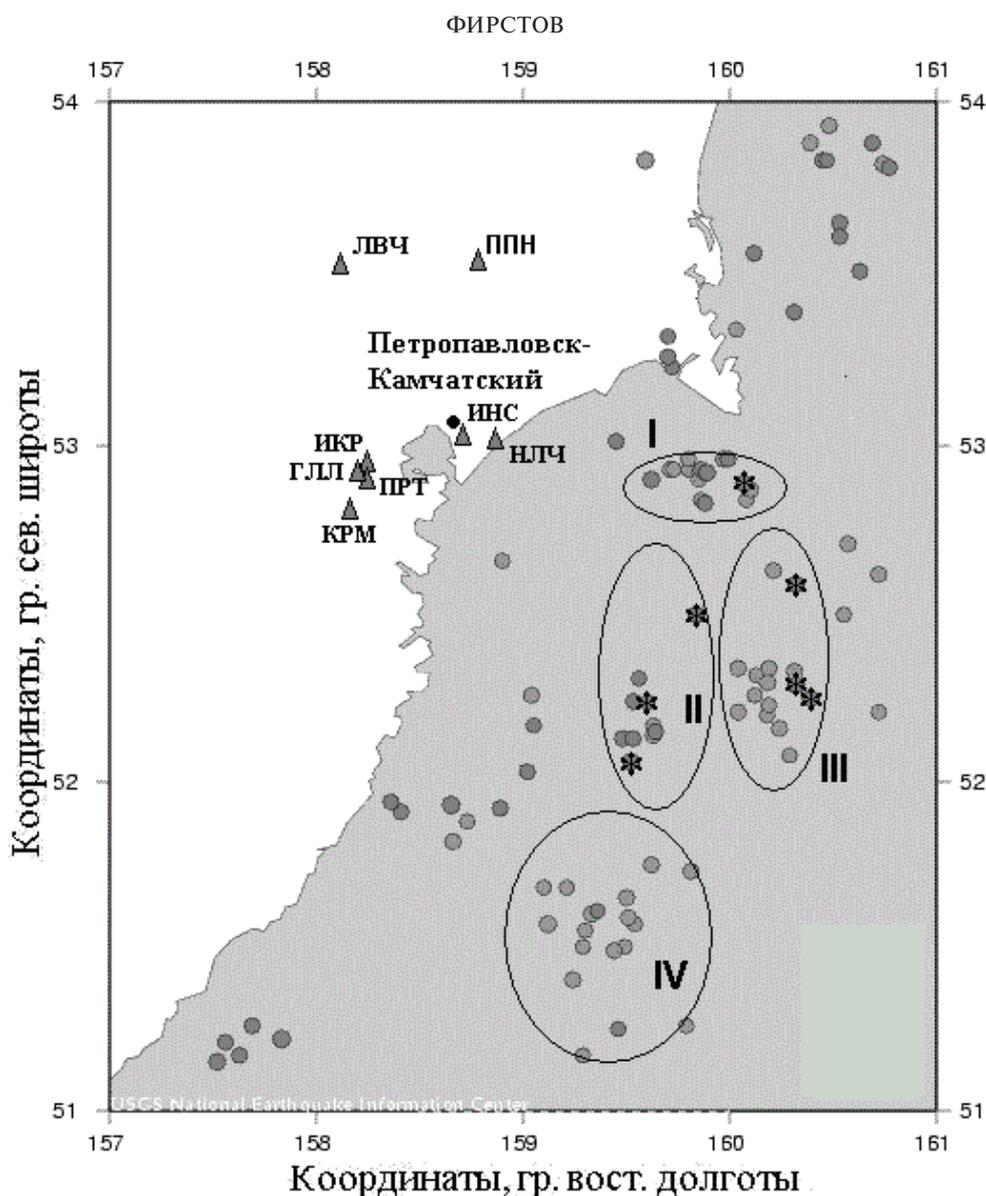


Рис. 3. Карта эпицентров землетрясений с $M > 5.5$ и $H < 70$ км за период 1973-2010 гг. по NEIC (National Earthquake Information Center) и схема расположения работавших пунктов мониторинга почвенного радона в период 1997-2010 гг. Название пунктов мониторинга: ЛВЧ – Левая Авача, ППН – Природный парк «Налычево», ИНС – здание ИВиС ДВО РАН, НЛЧ – застава «Налычево», ИКР – здание Института космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, ПРТ – ручей Коркино, КРМ – р. Карымшина, ГЛЛ – Голубая лагуна. Звездочками выделены эпицентры землетрясений, в период работы сети пунктов мониторинга почвенного радона, а эллипсами эпицентральные области: I – подводное продолжение Шипунского регионального разлома; II – Авачинская котловина; III и IV – Северный и Южный блок подводного хребта Шатского.

агрегированный сигнал для многомерного ряда по методике А.А. Любушина (1993), на котором достаточно четко выделяется аномалия 7-11 октября, превосходящая фон более чем на порядок (рис. 6а).

Как и в предшествующем случае, при допущении плоского фронта возмущения («геодеформационная волна»), распространяющегося с постоянной скоростью, рассчитывался азимут на источник и угол выхода волны. Азимут на источник «геодеформационной волны» имеет довольно близкое направление на эпицентр землетрясения, а кажущаяся скорость ее распро-

странения составит 104 км/сут (рис. 4б).

В период с 5 по 21 сентября 2012 г. в районе Авачинской котловины произошел рой слабых землетрясений с $K < 10.5$ на глубинах от 90 до 100 км (рис. 4б). Автор рассматривает эти землетрясения как индикаторы сейсмического течения геосреды сейсмофокальной зоны перед землетрясением 15 октября, о чем еще в 70-е годы прошлого столетия писал Ю.В. Ризниченко (1965).

В XXI в. многие исследователи обращают внимание на реологические свойства геоматериала и усложняют модель процесса подготовки землетрясения (Соболев, Пономарев, 2003).

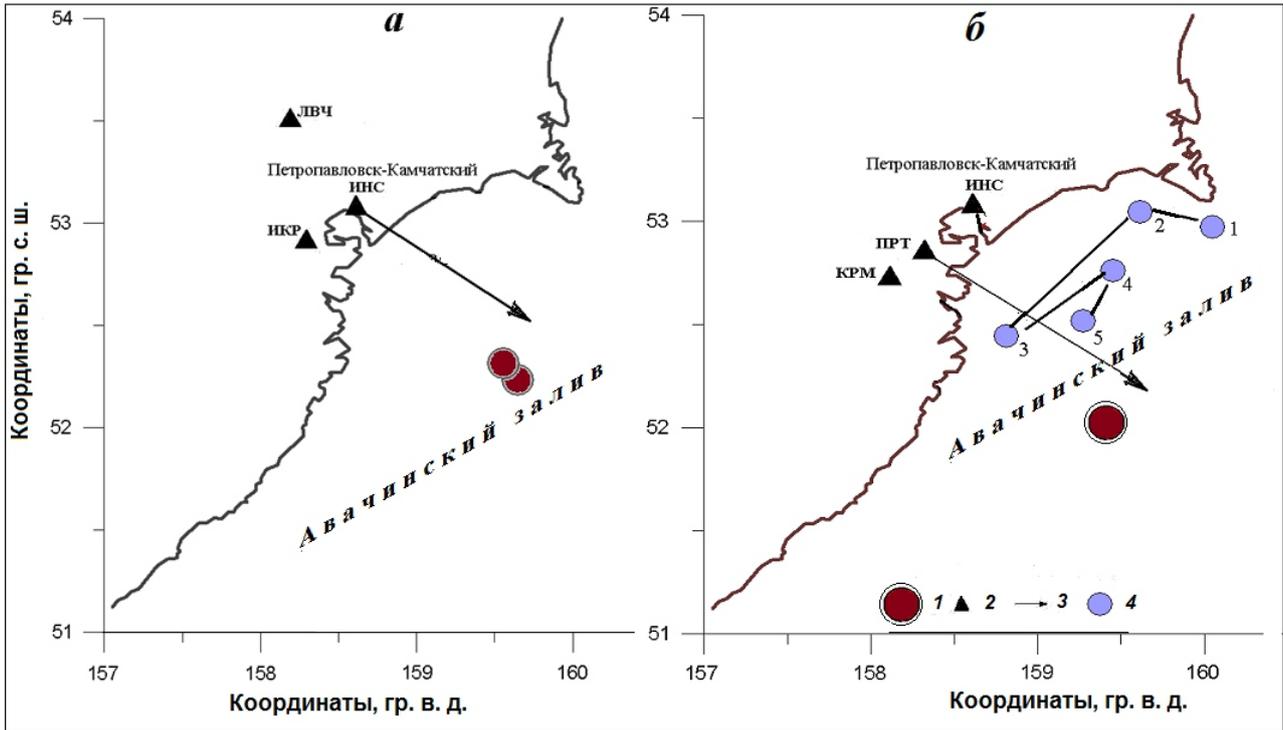


Рис. 4. Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга и эпицентры сильных землетрясений: роевой последовательности в 4-5 августа 2004 г. (а); произошедших в Авачинском заливе в сентябре-октябре 2012 г. (б).

1 – эпицентры рассматриваемых землетрясений; 2 – пункты радонового мониторинга; 3 – азимут на источник «геодеформационной волны»; 4 – эпицентры серии землетрясений 05-21 сентября 2012 г. с энергетическим классом $8.5 \leq K \leq 10.2$ и глубиной очага $90 \leq H \leq 102$ км.

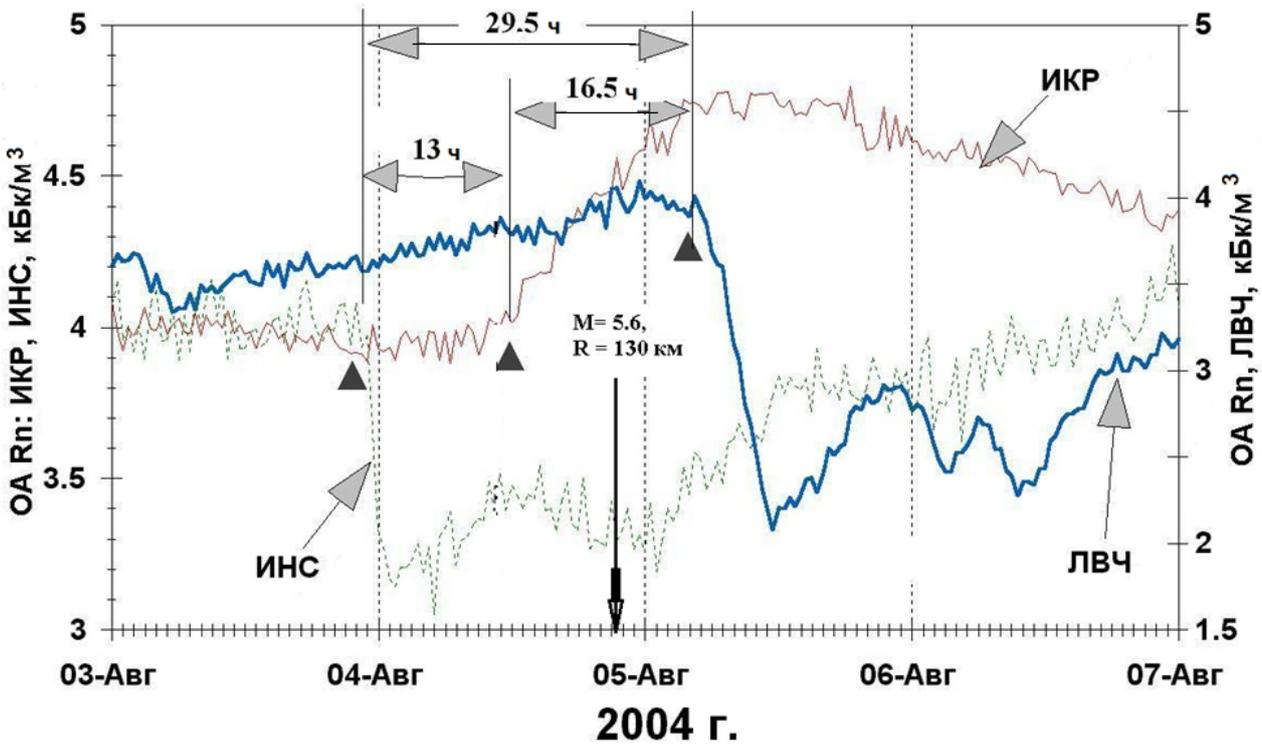


Рис. 5. Исходные данные регистрации ОА Rn в зоне аэрации на пунктах ИНС, ИКР, ЛВЧ 3-6 августа 2004 г. Треугольниками отмечены моменты вступления аномалий.

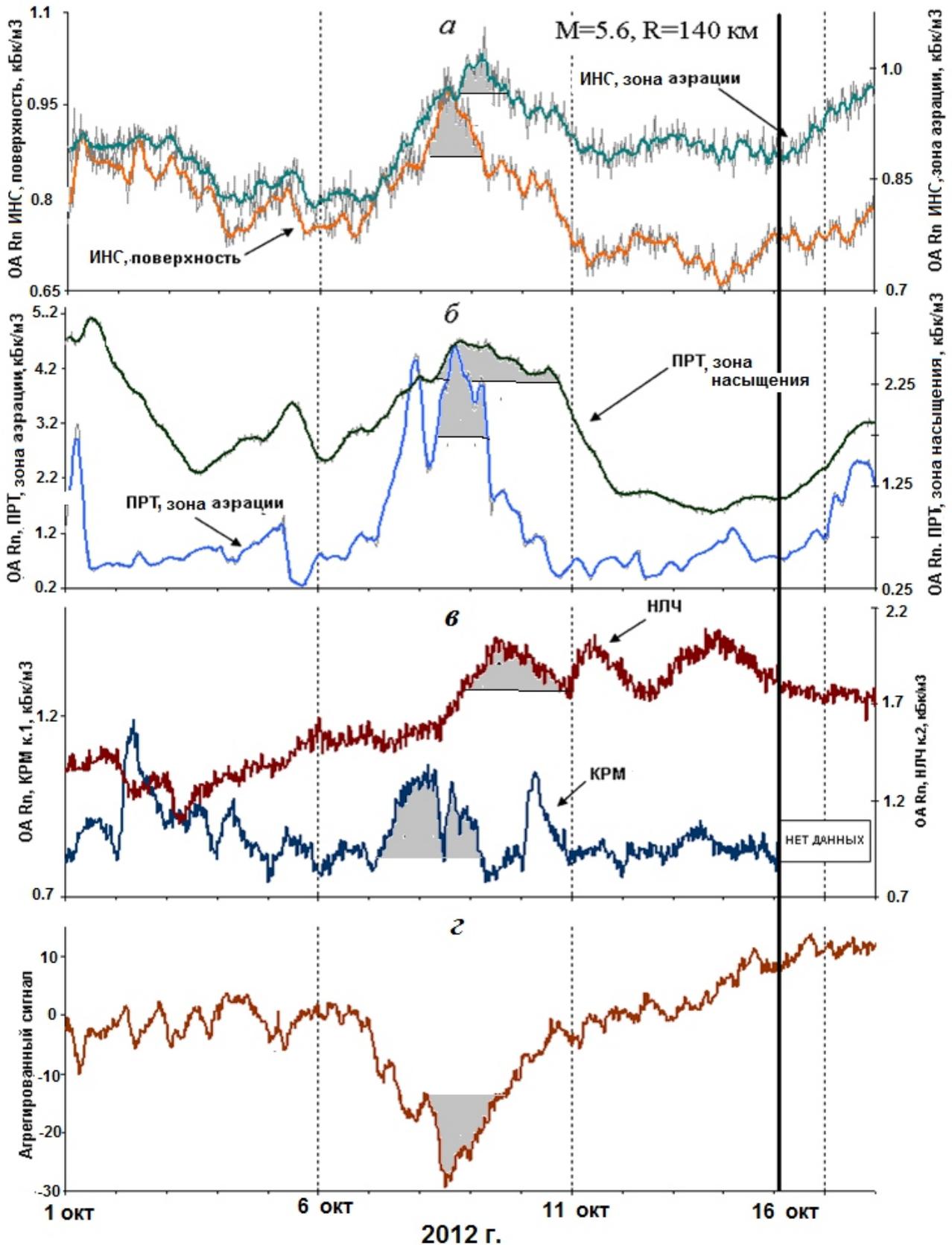


Рис. 6. Динамика ОА Rn в пунктах радонового мониторинга: *а* – ИНС (зона аэрации, поверхность), где на фоне барокompенсированных временных рядов жирными линиями показаны данные, осредненные скользящим средним; *б* – ПРТ (зона аэрации, зона насыщения); *в* – ИЛЧ, КРМ (зона аэрации); *г* – агрегированный сигнал приведенных временных рядов. Серым цветом выделены предвестниковые аномалии. Сплошной вертикальной линией отмечен момент возникновения землетрясения 15.10.2012 г. с $M = 5.6$ и эпицентральной дистанцией до опорного пункта ПРТ $R=140$ км.

Так, в работе (Моргунов, 2001) показано, что в фокальной зоне очага хрупкому разрушению – землетрясению – может предшествовать квазивязкое течение горных масс в результате ползучести (крипа). Минимальное время этой стадии оценивается не менее 10 часов до толчка. Также интенсивно обсуждается вопрос о медленных волнах деформации, которые имеют определенное теоретическое обоснование и косвенно выделяются в геофизических полях, но прямые экспериментальные доказательства существования этих волн пока очень немногочисленны, что показано в детальном обзоре (Быков, 2006).

Встает вопрос – где могут находиться источники квазипластического течения геоматериала, порождающие «геодеформационные волны»? Для землетрясения 15 октября 2012 г., с учетом предшествующей ему сейсмичности, можно, в первом приближении, оценить местоположения источника квазипластического течения геоматериала. Рассмотрим поперечный разрез фокальной зоны для района северной части Авачинского залива, приведенный в работе (Федотов и др., 1987), на котором показаны очаги землетрясений с энергетическим классом $K > 8.5$ за период 1962-1985 гг., а также очаг сильнейшего землетрясения Камчатки с $M = 8.5$ в 1952 г. и очаг

землетрясения с $M = 7.2$ в 1971 г., вызвавшего наибольшее сотрясения в г. Петропавловске-Камчатском (6-8 баллов) после землетрясения 1952 г. (рис. 7). Очаги слабых землетрясений, зарегистрированных перед событием 15 октября 2012 г., образуют компактную область на внутренней границе зоны Беньофа-Заварицкого. Можно предположить, что в данном месте кроме сейсмического произошло и квазипластическое течение геоматериала. Пространственно, предполагаемая зона квазипластического течения и очаг землетрясения разнесены более чем на 90 км. Однако процесс квазипластического течения на глубинах 100 км мог спровоцировать хрупкое разрушение геоматериала сейсмофокальной зоны на меньших глубинах.

Аномалии в динамике ОА Rn перед сильными землетрясениями в Авачинском заливе, предположительно, будем считать реакцией поля почвенного Rn на отклик деформирования блочных массивов горных пород в результате возникновения «геодеформационных волн». В пользу данного предположения говорит азимут подхода аномалий на пункты регистрации Rn, близкий к направлению на эпицентры землетрясений, а также наличие «деформационной волны», зарегистрированной наклономерной

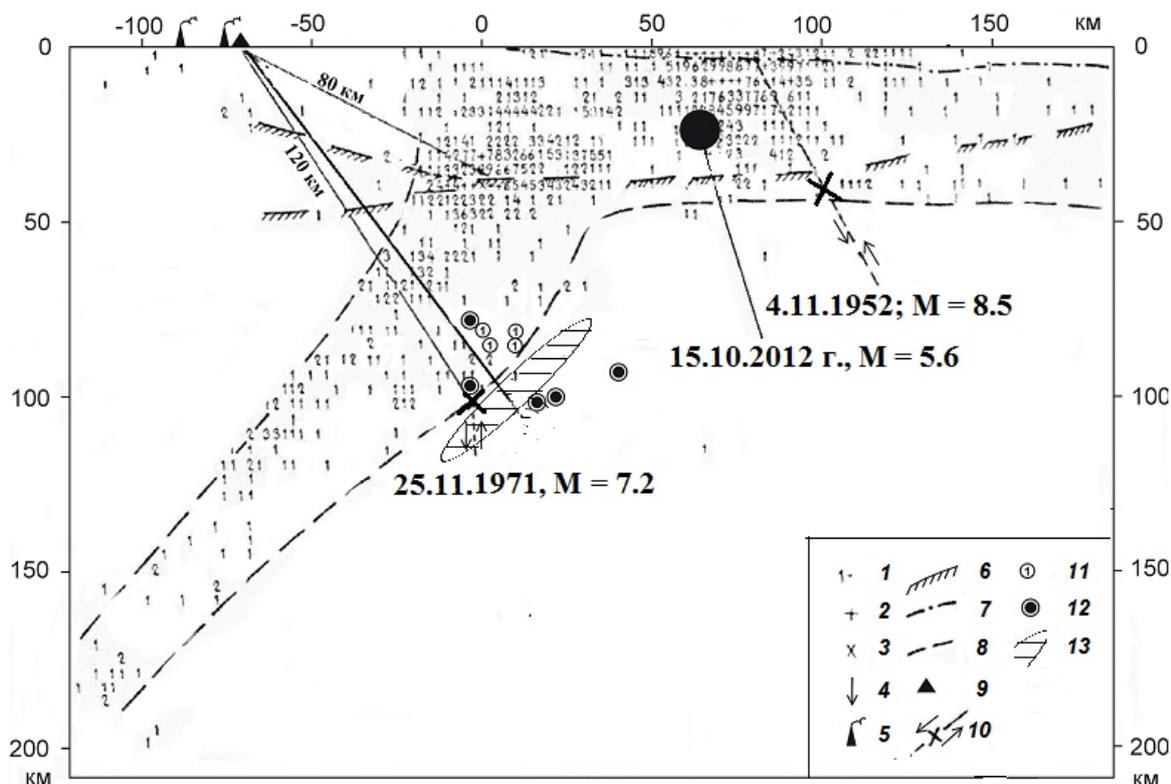


Рис. 7. Поперечный разрез сейсмофокальной зоны для района северной части Авачинского залива по (Федотов и др., 1987). Землетрясения с $K \geq 8.5$ за период 1962 – 1981 гг.: 1-3 число землетрясений в прямоугольнике $6.25 \cdot 10.5$ км²: от 1 до 9; от 10 до 20; от 21 до 30 соответственно; 4 – ось глубоководного желоба; 5 – вулканы; 6 – граница Мохоровичича; 7 – рельеф морского дна; 8 – контур фокальной зоны; 9 – сейсмические станции; 10 – след плоскости подвижки и направление подвижки в очагах сильнейшего землетрясения 1952 г. и землетрясения 1971 г.; 11 – афтершоки землетрясения 1971 г.; 12 – гипоцентры землетрясений с $K = 8.5-10.2$ (05-21 сентября 2012 г.); 13 – предполагаемая область квазипластического течения.

станцией перед землетрясением в Авачинском заливе 15.10.2012 г. с $M=5.6$ (Фирстов и др., 2013).

Как показано в экспериментальной работе (Кочарян и др. 2003), резкие, в том числе кратковременные, изменения напряженно-деформированного состояния контакта между блоками горной породы 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 может порождать «геодеформационные волны», обусловленные взаимодействием отдельных блоков геологической среды. Этот процесс воздействует на поле R_n , причем в зависимости от расположения пунктов регистрации относительно границ отдельных блоков, аномалии имеют различную форму (бухтообразные, ступенчатые), а также различную полярность в зависимости от геолого-тектонических условий того или иного пункта регистрации (Фирстов и др., 2011). Поэтому с целью формализации и выделения предвестниковых аномалий целесообразно исследовать коллективное поведение динамики R_n на всех пунктах сети с выбраковкой моментов неблагоприятных метеорологических условий.

В настоящее время на сети пунктов Петропавловска-Камчатского геодинамического полигона апробируется методика дискриминантных функционалов (Исакевич и др., 2013), позволяющая выделять во временных рядах реперные точки, связанные с возмущением поля почвенного R_n на последней стадии подготовки сильных землетрясений.

СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ И СЕВЕРНЫХ КУРИЛ

В пункте ПРТ регистрация осуществляется в нескольких точках. Представительные ряды данных, начиная с ноября 2000 г., получены в двух точках: 1 — зона аэрации, заборная емкость заглублена на один метр от поверхности; 2 — зона насыщения, заборная емкость заглублена на 3 метра.

Проанализированы ряды данных с 1.10.2000 г. по 1.12. 2013 г. Предварительно данные подвергались компенсации на баровариации по методике А.А. Любушина (1993) и затем усреднялись в полусуточных интервалах, с последующим усреднением скользящим средним в пятисуточном окне с целью уменьшения влияния «высококачественной» составляющей (рис. 8).

Для обеих точек регистрации видна четкая сезонная зависимость $OA R_n$, которая обусловлена сезонным изменением температуры гелиотермозоны рыхлых отложений и уровнем грунтовых

вод (УГВ). В осенне-зимний период происходит промерзание гелиотермозоны и уменьшение ее проницаемости, приводящей к увеличению $OA R_n$ в зоне насыщения и ее уменьшению в зоне аэрации, что свидетельствует о большой роли конвективной составляющей. Весной, когда температура воздуха принимает плюсовые значения, за счет инфильтрации талых вод начинает подниматься УГВ. В результате этого в зоне насыщения наблюдается уменьшение $OA R_n$ на 20-25% и резкое увеличение до 200% и более в зоне аэрации. Последующее падение УГВ приводит к перемещению столба атмосферы в рыхлых отложениях внутрь зоны аэрации и, соответственно, к резкому уменьшению $OA R_n$ в зоне аэрации (эффект «засасывания») и увеличению его в зоне насыщения. На Камчатке четко выражены два периода подъема УГВ — весенний и осенний. Наиболее четко эффект подъема УГВ проявился в 2001 и 2004 г., что связано с мощностью снегового покрова и резким повышением температуры воздуха в весенний период и большим количеством осадков в осенний период в эти годы (рис. 8а).

В летний период прогрев гелиотермозоны способствует увеличению проницаемости, особенно в сухую погоду, и увеличению $OA R_n$ в зоне аэрации. Такое проявление сезонности в районе геотермального месторождения позволяет говорить, что горизонт термальных вод можно рассматривать как рудное тело, выделяющее эманации в слой рыхлых отложений над ним, что приводит к изменению градиента $OA R_n$ в зависимости от проницаемости гелиотермозоны (Фирстов, 2002, 2003).

Для зоны насыщения характерно резкое уменьшение $OA R_n$ в период 2005-2007 гг., а для зоны аэрации наблюдается почти двукратное уменьшение $OA R_n$ после 2007 г. Последнее объясняется тем, что в силу техногенных причин (изменение системы водоснабжения) уровень грунтовых вод в зоне аэрации поднялся. В работе (Климшин и др., 2014) показано, что повышение уровня грунтовых вод приводит к снижению значений плотности потока радона, за счет более низкого значения коэффициента диффузии R_n в водонасыщенном грунте, а также уменьшения мощности активного слоя грунта.

С целью поиска среднесрочных предвестников сильных землетрясений северного фланга Курило-Камчатской дуги, временной ряд за период 2010-2013 гг. $OA R_n$ в зоне насыщения в пункте ПРТ исследовался с помощью мультипликативной модели с учетом сезонности согласно работе (Бокс, Дженкинс, 1974).

Сопоставим характер поведения разностной кривой $OA R_n$, полученной путем вычета расчетной из экспериментальной, с наиболее

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

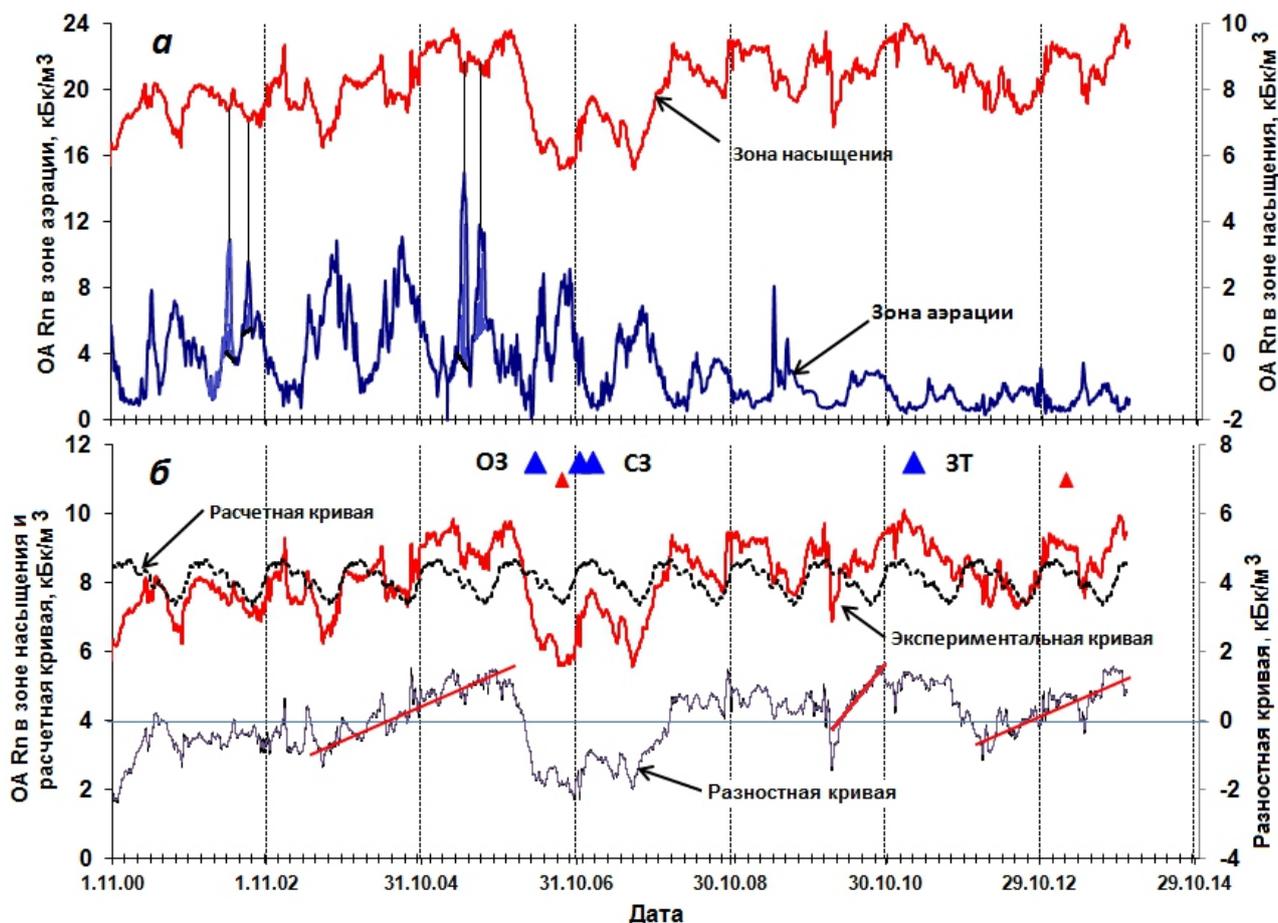


Рис. 8. Временные ряды OA Rn в зоне аэрации (глубина 1 м) и в зоне насыщения (глубина 3 м) в опорном пункте ПРТ, осредненные скользящим средним в пяти суточных интервалах, выделены моменты наиболее сильного подъема уровня грунтовых вод в 2001 и 2004 г. (а), мультипликативная сезонная модель зоны насыщения и разностная кривая между экспериментом и моделью, тонкими линиями показаны тренды перед землетрясениями с магнитудой больше 7.5 (б). Большие треугольники – сильные землетрясения с $M > 7.5$, маленькие с $M > 6.5$. О3 – Олюторское землетрясение (Камчатка); С3 – Симуширские землетрясения (Средние Курилы); 3Т – землетрясение Тохоку (Япония).

сильными землетрясениями зоны субдукции района Камчатки и Средних Курил, основные параметры которых приведены в табл. 2.

С июня 2003 г. за 2.5 года перед сильными землетрясениями Камчатки и Средних Курил (Олюторское землетрясение и землетрясения вблизи о. Симушир) на разностной кривой (рис. 8б) наблюдался тренд нарастание OA Rn, сменившейся резким падением почти на 30% в течение трех месяцев непосредственно перед Олюторским землетрясением. Низкий уровень OA Rn для зоны насыщения сохранялся почти полтора года.

Перед мегаземлетрясением Тохоку, произошедшем в Японии 11.03.2011 г. на расстоянии 2100 км от пункта регистрации, наблюдается подобная тенденция. Рост OA Rn на разностной кривой начался в марте 2010 г. и продолжался 8 месяцев до начала ноября 2010 г., а затем стал уменьшаться до момента землетрясения. С начала 2012 г. по настоящее время на разностной кривой OA Rn наблюдается тренд возрастания

(рис. 8б). Линейная зависимость, аппроксимирующая рост отрезков разностных кривых OA Rn для обоих участков (рис. 9), весьма близка:

$$OA Rn(\text{Бк/м}^3) = 0.0026 \cdot t(\text{сутки}) - 100.11 \text{ (перед О3);}$$

$$OA Rn(\text{Бк/м}^3) = 0.0027 \cdot t(\text{сутки}) - 100.64 \text{ (в настоящее время).}$$

По мнению автора, возрастающий с ноября 2012 г. тренд OA Rn в зоне насыщения в пункте ПРТ дает основание ожидать в конце 2014 г. на северном фланге Курило-Камчатской зоны субдукции землетрясение с $M > 7.5$ и глубиной очага 0-70 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов, полученных на сети пунктов мониторинга OA Rn на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне показано, что для районов гидротермальных систем распределение концентрации Rn с глубиной можно рассматривать как случай с сосредото-

Таблица 2. Каталог землетрясений за 2000–2013 гг., рассматриваемых с позиции возможного резкого изменения скорости движения северо-восточной части Тихоокеанской плиты.

M > 7.5							
	Дата	Время, чч:мм:сс	Координаты		Н, км	M	Область эпицентра землетрясения
			φ	λ			
1.	20.04.2006	23:52:02	60.94	167.14	22	7.6	Олюторское, север Камчатки
2.	15.11.2006	11.14.13	46.58	153.27	10	8.3	Средние Курилы, о. Симушир
3.	13.01.2007	04.23.21	46.23	154.55	10	8.1	
4.	11.03.2011	05:46:24	38.10	142.85	24	9.0	Землетрясение Тохоку, Япония
M ≥ 6.5							
1	24.08.2006	21.50.36	51.15	157.54	43	6.5	
2	28.02.2013	14.05.50	50.94	157.34	41	6.9	

Примечание: φ – широта, гр. с. ш.; λ – долгота, гр. в. д.; M – магнитуда по данным NEIC (National Earthquake Information Center); Н – глубина очага землетрясения.

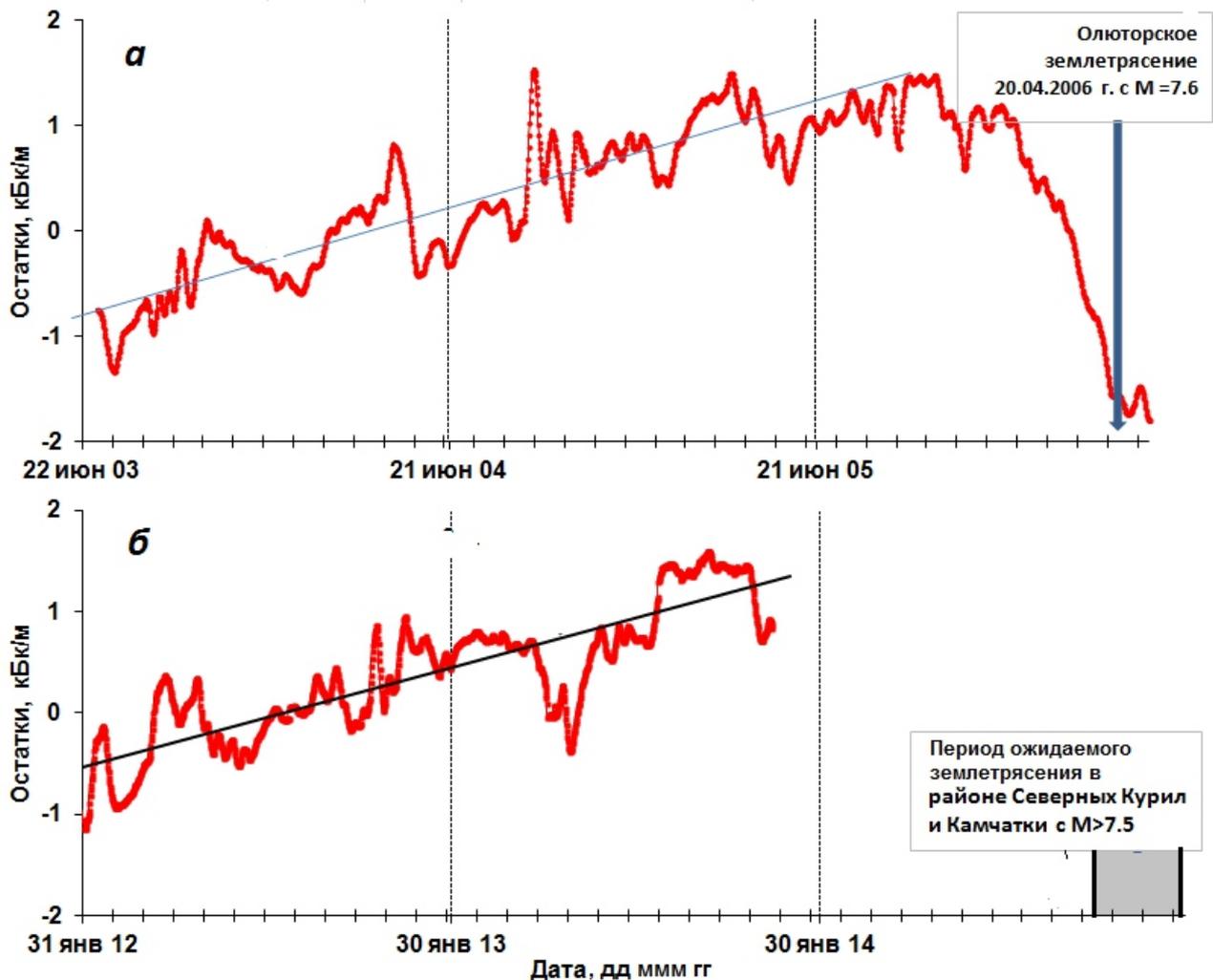


Рис. 9. Динамика поведения ОА Rn разностной кривой после вычета расчетной мультипликативной модели с учетом сезонности из экспериментальной кривой перед Олюторским землетрясением 20 апреля 2006 г. с M = 7.6 (а) и в настоящее время (б). Прямыми линиями показаны расчетные зависимости трендов ОА Rn(Бк/м³) = a·t(сутки) +b, рассчитанные методом наименьших квадратов.

ченными параметрами, когда перенос эманаций осуществляется через слой рыхлых отложений от обогащенного водоносного слоя минерализованных радоновых вод. Это подтверждается реакцией динамики ОА Rn в зонах аэрации и насыщения на баровариации и сезонный ход температуры воздуха в пунктах расположенных в районе Паратунского геотермального месторождения.

Для 7 землетрясений Авачинского залива с $5.5 < M < 6.9$, произошедших в период работы сети, четыре землетрясения имели предвестниковые аномалии в поле почвенного радона, что позволяет говорить о возможности прогноза землетрясений с вероятностью ~ 0.6 . Предвестниковые аномалии связаны с «геодеформационными волнами», возникающими в результате квазипластичного течения геоматериала в сейсмофокальной зоне. По-видимому, на последней стадии подготовки землетрясений с $M > 7$ следует ожидать более сильное проявление квазипластического течения геоматериала в зоне субдукции, что повышает вероятность прогноза землетрясений больших магнитуд с помощью мониторинга концентрации почвенных газов.

В настоящее время в зоне насыщения на опорном пункте ПРТ почти двухлетний тренд ОА Rn дает основание ожидать в конце 2014 г. на северном фланге Курило-Камчатского зоны субдукции на глубинах 0-70 км землетрясение с $M > 7.5$ и глубиной очага 0-70 км. Время землетрясения совпадает с выводами работы (Серафимова, 2013) в которой показано, что частота возникновения сильных землетрясений для полуострова Камчатка приходится на осенне-зимние месяцы. Предположительно, вероятным местом ожидаемого землетрясения может быть район от полуострова Шипунский до острова Шиашкотан (Средние Курилы), где согласно долгосрочному прогнозу на период IX 2013-VIII 2018 гг. наиболее высока вероятность землетрясения с $M > 7.7$ (Федотов и др., 2012).

При дальнейших исследованиях прогноз будет корректироваться по данным сети пунктов мониторинга почвенного Rn с целью уточнения времени предполагаемого землетрясения и выдачи краткосрочного прогноза по разрабатываемой в КФ ГС РАН методике, частично описанной в работах (Исакевич и др., 2013; Фирстов, 2002, 2003; Фирстов и др., 2011;).

Написанию настоящей статьи во многом способствовали дискуссии с **В.П. Рудаковым**, которые позволили автору лучше понять физику процесса переноса Rn в рыхлых отложениях.

Автор выражает благодарность А.В. Викулину и В.А. Рашидову за конструктивные замечания, способствующие улучшению работы, В.Н. Волошину за его самоотверженный труд,

способствовавший получению непрерывных временных рядов, О.Е. Макарову и И.П. Глухой за помощь в обработке экспериментального материала.

Список литературы

- Абдуалиев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П.* Радоновый предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии // ДАН. 1986. Т. 291. № 4. С. 924-927.
- Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с.
- Быков В.Г.* Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 11. С. 1176-1190.
- Исакевич В.В., Фирстов П.П., Исакевич Д.В и др.* Использование методики дискриминантных функционалов для выявления реперных точек во временных рядах концентрации почвенного радона на сети пунктов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября-5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 59-63.
- Климшин А.В., Антипин А.Н., Микляев П.С. и др.* Влияние уровня грунтовых вод на перенос радона в почвенном воздухе на полигоне в Екатеринбургe // АНРИ. 2014. №2. С. 2-9.
- Кочарян 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.
- Любушин А.А. (Мл)* Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103-108.
- 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. № 1. С. 3-11.
- Моргунов В.А.* Крип горных пород на завершающей стадии подготовки землетрясений // Физика Земли. 2001. № 4. С. 3-11.
- Новиков Г.Ф.* Радиометрическая разведка. Л.: Наука, 1989. 408 с.
- Паровик, Р.И., Ильин И.А., Фирстов П.П.* Обобщенная одномерная модель массопереноса радона (ОА 222Rn) и его эксхалация в приземный слой атмосферы // Математическое моделирование. 2007. № 11. Т. 19. С. 43-50.
- Паровик, Р.И., Шевцов Б.М., Фирстов П.П.* Модель переноса радона (222Rn) в режиме

- супердиффузии во фрактальной среде // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. 2008. № 2. Т. 10. С. 79-85.
- Паровик, Р.И., Шевцов Б.М., Фирстов П.П.* Математические модели переноса радона в естественных средах // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 196-201.
- Ризниченко Ю.В.* О сейсмическом течении горных масс // Динамика земной коры / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1965. С. 12-26.
- Рудаков В.П.* Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ. Автореф. дисс. докт. физ.-мат. наук. М. 1992 г. 37 с.
- Рудаков В.П.* Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 2009. 175 с.
- Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: ФОН, 2009. 191 с.
- Серафимова Ю.К.* О связи сезонности и сильных ($M \geq 6.0$) землетрясений Курило-Камчатского региона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября - 5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 200-204.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- Спивак, А.А., Сухоруков М.В., Харламов В.А.* Особенности эманации радона ^{222}Rn с глубиной // ДАН. 2008. Т. 420. № 6. С. 825-828.
- Уткин В.И., Юрков А.К.* Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 82-94.
- Федотов С.А., Шумилина Л.С., Чернышова Г.В.* Сейсмичность Камчатки и Курильских островов по данным детальных исследований // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 29-60.
- Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской островной дуги на IX 2011 – VIII 2016 гг.: вероятное место, время и развитие сильнейшего землетрясения Камчатки с $M \geq 7.7$ // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 3-26.
- Фирстов П.П.* Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997-1998 гг. с целью прогноза предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33-43.
- Фирстов П.П.* Разработка методики поэтапного выделения среднесрочных, краткосрочных предвестников сильных землетрясений Авачинского залива (Камчатка) в динамике подпочвенного радона / В кн: Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. РФФИ в Азиатском регионе. Иркутск: Наука, 2002. С. 533-535.
- Фирстов П.П.* Особенности поведения сезонного хода на станциях сети мониторинга подпочвенного радона и его связь с подготовкой сильных землетрясений Авачинского залива (Камчатка) // Вулканизм и геодинамика. Материалы II всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург: Ин-т геологии Ур. РАН, 2003. С. 934-938.
- 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.
- Фирстов П.П., Макаров О.Е., Малышева О.П.* Отражение в динамике почвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне последней стадии подготовки землетрясений с магнитудой больше 5.5 района Авачинского залива // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9-15 октября 2011 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 154-158.
- 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, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы», Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013 г. С. 191-197.
- 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 // Annals of Geophysics. 2007. V. 50. № 4. P. 546-557.
- 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.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
**FORECASTING OF LARGE EARTHQUAKES BASED ON RADON MONITORING
IN THE PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKY GEODYNAMICAL TESTING AREA**

P.P. Firstov

*Kamchatka Branch, Geophysical Survey, the Russian Academy of Sciences
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006; e-mail: firstov@emsd.ru*

The paper presents the results from monitoring of soil radon in loose deposits within a network of observational sites in Petropavlovsk-Kamchatskiy geodynamical testing area. The paper describes the basic of radon technique for a short-term forecast of large earthquakes of $M > 5.5$ for southern Kamchatka. The monitoring of seasonal component in volumetric radon activity in the saturation zone for the period 2000-2003 at Paratunka site allowed us to suggest the medium-term forecast of a $M > 7.5$ earthquake for the 2014 autumn-winter period in southern Kamchatka and the Northern Kuriles.

Keywords: Kamchatka, soil radon, seismicity, the forecast of earthquake.