
УДК 550.338

ДИНАМИКА ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА НА ПЕТРОПАВЛОВСК-
КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ В ИЮЛЕ-
АВГУСТЕ 2010 г.

Макаров Е.О.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Фирстов П.П.,

Проведено сопоставление вариаций объемной активности радона в подпочвенном воздухе на сети станций Петропавловск – Камчатского геодинамического полигона с сейсмической активностью Южной Камчатки. По времени начала вступления радоновых аномалий рассчитан азимут прихода «деформационной волны», который совпадает с направлением на эпицентр произошедших землетрясений. Зарегистрированные аномалии, предположительно, имеют деформационную природу и обусловлены процессами «квазивязкого» течения литосферы во время перестройки поля тектонических напряжений зоны субдукции. В динамике объемной активности подпочвенного радона выявлен предвестник с временем упреждения 18 суток роя землетрясений 30 июля 2010 г. с максимальной магнитудой $M_{\max} = 6.4$ и эпицентральной дистанцией 173 км от пункта регистрации. Ключевые слова: объемная активность радона, геодеформационная волна, предвестник, аномалия, рой землетрясений.

Введение

Исследованию связи между концентрацией радона (^{222}Rn) в почвенном воздухе и изменениями напряженно-деформированного состояния геосреды с целью прогноза землетрясений усиленно ведутся в течение последних нескольких десятков лет во всех сейсмоактивных регионах Земли. Перспективность сейсмозманиационного метода показана в большом количестве работ [4, 6, 9, 10]. В данной статье рассматриваются особенности отклика объемной активности почвенного Rn (ОА Rn) на изменения напряженно-деформированного состояния литосферы района побережья Авачинского залива в связи с проявлением сейсмичности южной Камчатки в июле-августе 2010 г.

Аппаратура и методика наблюдений

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне с 1997 г. работает сеть пунктов мониторинга почвенного Rn с целью поиска предвестников сильных землетрясений южной Камчатки [5, 6]. Приборная база за время существования сети модернизировалась и оснащалась современной аппаратурой. Расположение пунктов регистрации также менялось с целью поиска мест с наибольшей тензочувствительностью. В рассматриваемый период работала сеть из шести пунктов, которые показаны на тектонической схеме акватории Авачинского залива (рис. 1), а их координаты и краткая характеристика грунтов пунктов приведена в табл. 1.

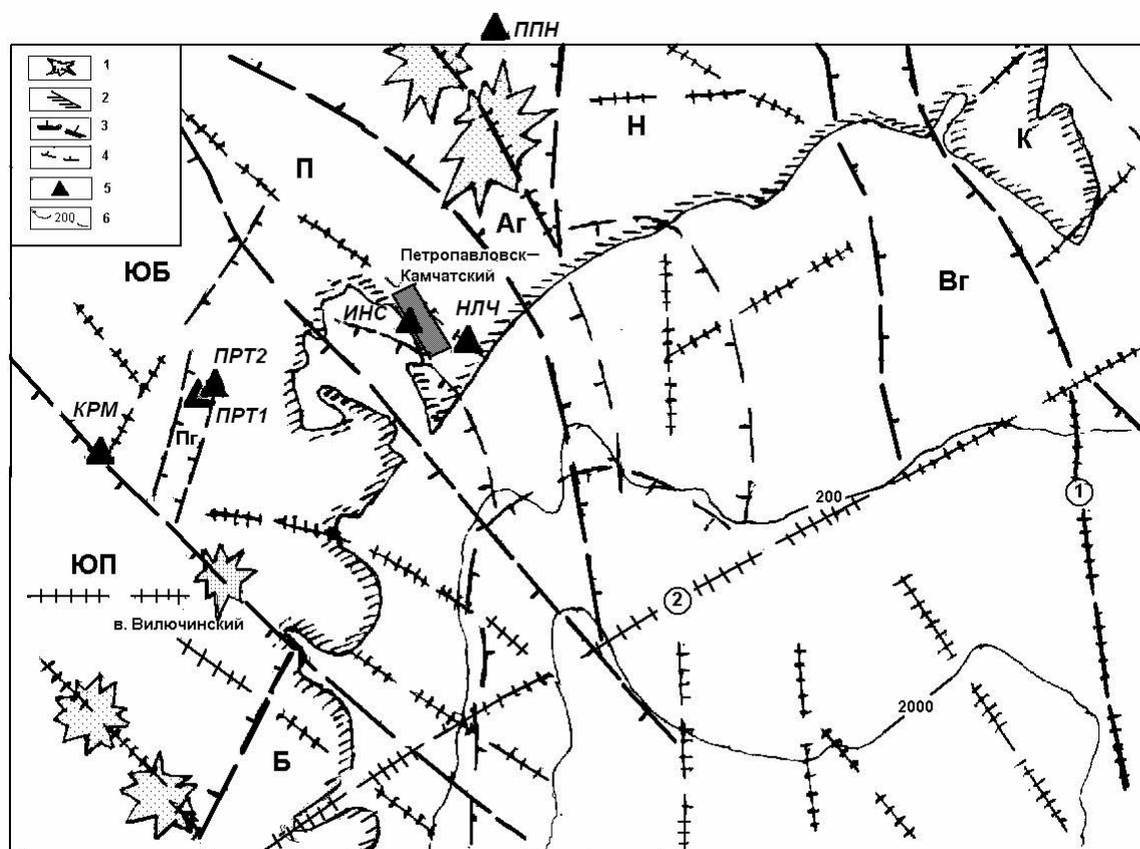


Рис. 1. Тектоническая схема акватории Авачинского залива: 1- четвертичные вулканы; 2- береговая линия; 3- наиболее крупные разломы со значительными вертикальными смещениями (границы структур); 4 – разломы второго порядка (бергштрихи указывают на опущенный блок); 5 – пункты сети мониторинга почвенного Rn; 6 – изобаты. Геолого-тектонические структуры: Н - Налычевское поднятие; К – Калатырский горст; П - Петропавловский горст; Б – Береговой горст; Аг –Авачинский грабен; Пг –Паратунский грабен; Вг –Вахильский грабен, синклиналь; ЮБ – Южно-Быстринский блок; ЮП – Южно-Камчатский прогиб. Цифры в кружках – разломы регионального порядка: 1- Шипунский, 2 – Русский (схема составлена С.В. Попруженко и С.Е. Апрельковым, 1997 г.)

Таблица 1. Координаты и характеристика пунктов регистрации почвенного Rn на Петропавловск-Камчатском геодинамического полигоне, работавших в июле-августе 2010 г.

№	Пункт наблюдений	Усл. обозначение	Координаты		Используемая аппаратура	Краткая характеристика места расположения пункта
			φ	λ		
1	Карымшино	КРМ	52,80	158,10	РЕВАР; 2 канала – счетчики установлены в заборных емкостях: т. 1 – на поверхности; т. 2 – 0,75 м.	Пункты расположены в районе Паратунской гидротермальной системы, в пойме реки Паратунка и ее притоков Карымшина и Коркино. Датчики располагаются в шурфах элювиально-делювиальных отложений.
2	Геотермальный стационар	ПРТ2	52,97	158,25	РЕВАР; 2 канала – счетчики установлены в заборных емкостях: т. 1 – 2 м; т. 2 – 1 м.	
3	ИВиС ДВО РАН (подвал)	ИНС1	53,07	158,61	РЕВАР; 1 канал – счетчик установлен в шпуре	Датчики располагаются в рыхлых отложениях техногенного происхождения.
	ИВиС ДВО РАН, (скважина НИС-1)	ИНС2	53,07	158,61	ALMEMO 3 канала	
4	Налычево	НЛЧ	53,13	158,88	РЕВАР; 2 канала – счетчики установлены в заборных емкостях: т.1 – 5 м; т.2 – 4 м.	Прибрежная океаническая полоса.
5	Природный парк Налычево	ППН	53,51	158,76	РЕВАР; 2 канала – счетчики установлены в стволе скважины на глубине 2 и 4 м, забитой травертином.	Геотермальная система, датчики расположены в скважине, пробуренной в травертиновых отложениях.

Как видно на рис. 1 пункты сети радонового мониторинга расположены в разных структурных элементах побережья Авачинского залива, что дает основание предполагать различный отклик в динамике радона в зави-

симости от местоположения очага землетрясений средней силы с магнитудой $M \sim 6$.

В качестве датчиков на всех пунктах используются газоразрядные счетчики типа СБМ-19, что позволяет вести пассивную регистрации ^{222}Rn по β -излучению продуктов его распада [4]. С начала организации сети регистрация ведется с помощью радиометров РЕВАР изготовленных в КБ ИРЭ (Фрязино). Как правило, датчики располагаются в заборных емкостях (ведро – 10 л) на двух глубинах зоны аэрации: т. 1 – глубина около одного метра, т. 2 – глубина около двух метров. Достижение равновесия между Ra и его продуктами распада в заборной емкости повышает чувствительность измерений.

В настоящее время пункты сети оснащаются современными регистрирующими приборами серии **ALMEMO**, которые оборудованы системой коннекторов. Интеллектуальный коннектор **ALMEMO** обеспечивает важные преимущества при подключении датчиков и периферийного оборудования: все параметры сохраняются в запоминающем устройстве, размещенном в коннекторе. В результате не требуется программирования, которое обычно должно быть выполнено для подключения. Все датчики и выходные модули могут быть подсоединены ко всем измерительным устройствам **ALMEMO** одинаковым способом. Технология работы и программирование идентичны для всех устройств. Поэтому одновременно со счетом импульсов с газоразрядных датчиков, регистрируются метеорологические величины (температура и давление) и концентрация других почвенных газов, углекислого газа и молекулярного водорода.

Для регистрации Rn в качестве коннектора используется счетчик импульсов ZA9909AK2U, позволяющий регистрировать от 0 до 65000 импульсов с разрешением один импульс. Для счета импульсов с газоразрядных счетчиков СБМ-19 был изготовлен двухканальный формирователь импульсов, сигналы с которого подаются на коннекторы. Переход от концентрации к объемной активности осуществляется по эмпирической фор-

муле $OA Rn$ ($Бк/м^3$) = $9 \cdot N$ (имп/мин). На рис. 2. приведен общий вид регистрирующего комплекта на базе **ALMEMO 2690-8**, позволяющий регистрировать: температуру воздуха; концентрацию углекислого газа, молекулярного водорода и радона (2 канала).



Рис. 2. Общий вид регистрирующего комплекта на базе ALMEMO 2690-8: 1 – датчик CO_2 , 2 – датчик температуры, 3 – самописец ALMEMO 2690-8, 4 – двухканальный формирователь импульсов, 5 – водородный геофизический сигнализатор, 6 – аккумулятор.

Измерения ведутся с дискретностью от 10 минут до получаса. Все получаемые ряды данных хранятся в базе данных КФ ГС РАН «ПОЛИГОН».

Основные характеристики пунктов приведены в табл. 1. Особняком стоит пункт ИНС2, который располагается рядом со зданием ИВиС ДВО РАН в подземном бункере размером $2 \times 2 \times 2$ м³, построенном над оголовком научно-исследовательской скважины НИС-1. Датчики располагаются в скважине, в подпочвенном воздухе на глубине один метр от пола подземного бункера (зона аэрации) и на поверхности пола. Над бункером на поверхности земли установлен металлический контейнер. Подземный бункер через контейнер и систему труб вентилируется за счет естественной конвекции воздуха [8].

Характеристика сейсмичности южной Камчатки

в июле - августе 2010 г.

Происходящие в Курило-Камчатском регионе землетрясения являются отражением меняющейся во времени перестройки полей сейсмотектонических напряжений, связанных с процессом взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской тектонических плит. Сейсмичность в июле-августе 2010 г. весьма близка к сейсмичности в августе 2004 г, когда почти в этом же месте произошел рой землетрясений [7].

Как видно на рис. 3 и табл. 2 с 30 июля по 3 августа в Авачинском заливе на глубинах 20 - 60 км произошел рой землетрясений с максимальным энергетическим классом ($K = \lg E$, Дж) 14. Спустя две недели около мыса Шипунского произошел второй рой землетрясений на глубинах 40-60 км с $M_{\max} = 5.8$.

Таблица 2. Каталог землетрясений Камчатки с $K \geq 10$
за период 30 июня –19 августа 2010 г.

№	Дата, дд. мм. г.	Время, чч.мм.сс	Широта, гр. с.ш.	Долгота, гр. в.д.	Глубина, км	Энергетический класс
1	30.07.2010	1:48:40	52,29	160,45	44,08	11,6
2	30.07.2010	3:56:10	52,21	160,45	38,32	14,1
3	30.07.2010	4:02:17	52,25	160,24	20,88	10,5
4	30.07.2010	4:28:00	52,21	160,46	40,21	12,6
5	30.07.2010	6:22:41	52,21	160,40	20,33	10
6	30.07.2010	6:40:22	52,26	160,50	44,51	10,1
7	30.07.2010	7:37:36	52,31	160,32	39,49	10,2
8	31.07.2010	16:47:07	52,28	160,4	18,7	10
9	31.07.2010	18:21:32	52,29	160,33	40,64	10,6
10	02.08.2010	9:36:04	53,3	160,68	59,79	11
11	10.08.2010	9:09:03	53,33	160,67	50,54	10,2
12	14.08.2010	18:47:59	52,25	160,41	44,16	11,2
13	15.08.2010	2:10:35	53,25	160,74	56,12	12,9
14	15.08.2010	2:12:45	53,27	160,46	50,7	10,9
15	19.08.2010	8:45:12	54,49	161,73	48,38	10,6

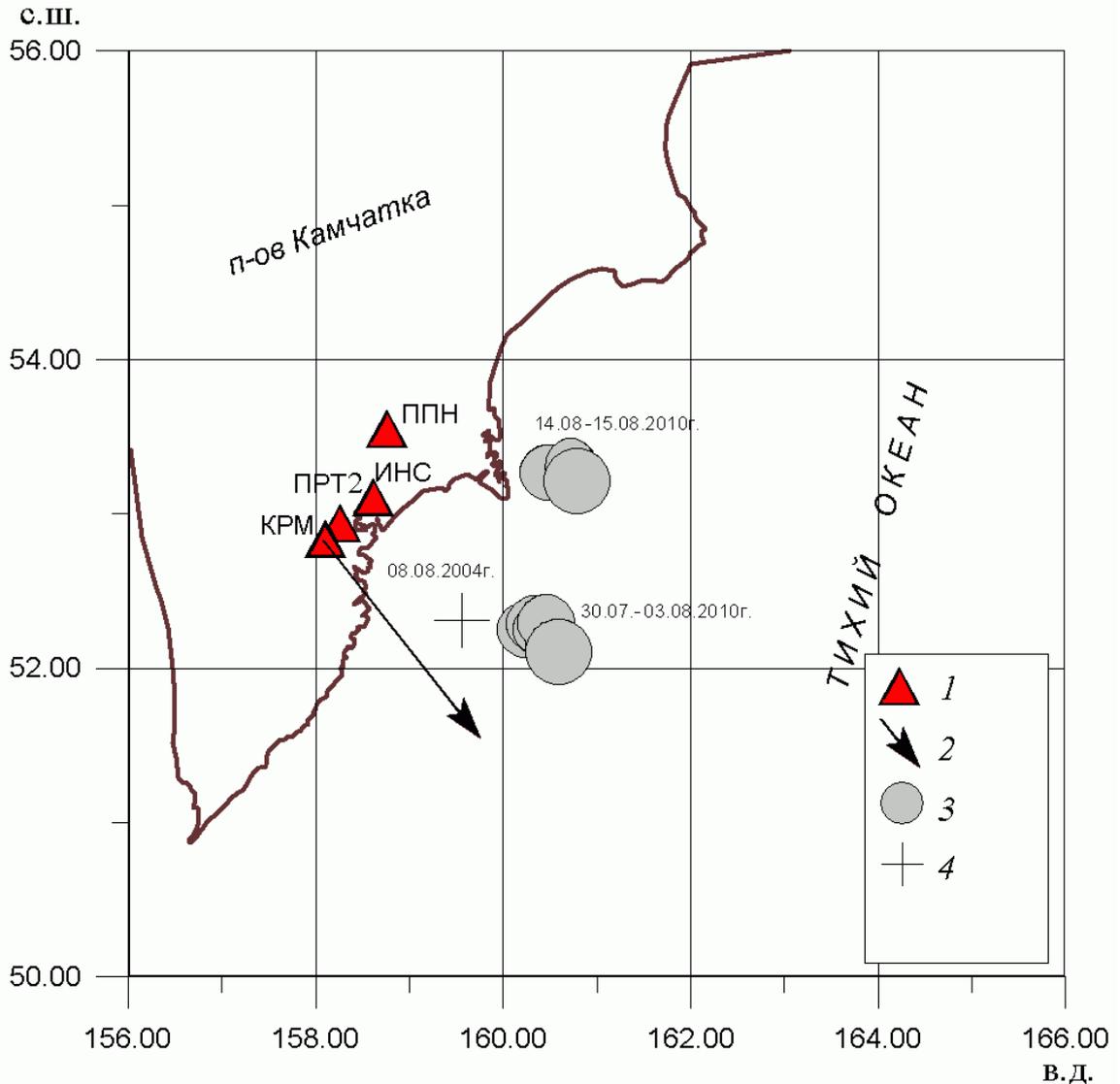


Рис. 3. Схема расположения сети пунктов радонового мониторинга в 2010 г. 1 – пункты наблюдений: ИНС – Институт вулканологии и сейсмологии; ПРТ2 – геотермальный стационар; КРМ – Карымшино; ППН – природный парк Налычево; 2 – азимут на источник «геодеформационных» волн; 3 – эпицентры землетрясений за период 30 июня – 19 августа с энергетическим классом $K \geq 10$; 4 – эпицентр сейсмического события 8 августа 2004 г.

Результаты наблюдений за объемной активностью радона

На рис. 4а показана динамика ОА Rn за период 01 июля – 25 августа 2010 г. в воздухе подземного бункера, в пункте регистрации КРМ и в пункте ПРТ2. Известна хорошо выраженная зависимость ОА ^{222}Rn в подпочвенном воздухе от метеорологических параметров, поэтому на рис. 4б приведены графики изменения температуры (T), атмосферного давления (P) и осадков (O). Сплошными вертикальными линиями отмечены моменты возникновения сильных землетрясений в районе Авачинского залива.

Следует отметить увеличение ОА Rn в период с 11 по 29 июля на всех пунктах регистрации, что может свидетельствовать об увеличении скорости конвективного потока подпочвенных газов в результате изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды.

С целью выявления общих элементов поведения в динамике ОА Rn на пунктах ИНС1, ИНС2, КРМ (две точки) на основе четырехмерного ряда по методике А.А. Любушина [2] построен агрегированный сигнал. В агрегированном сигнале четко выделяется аномалия 12 июля (рис 4а).

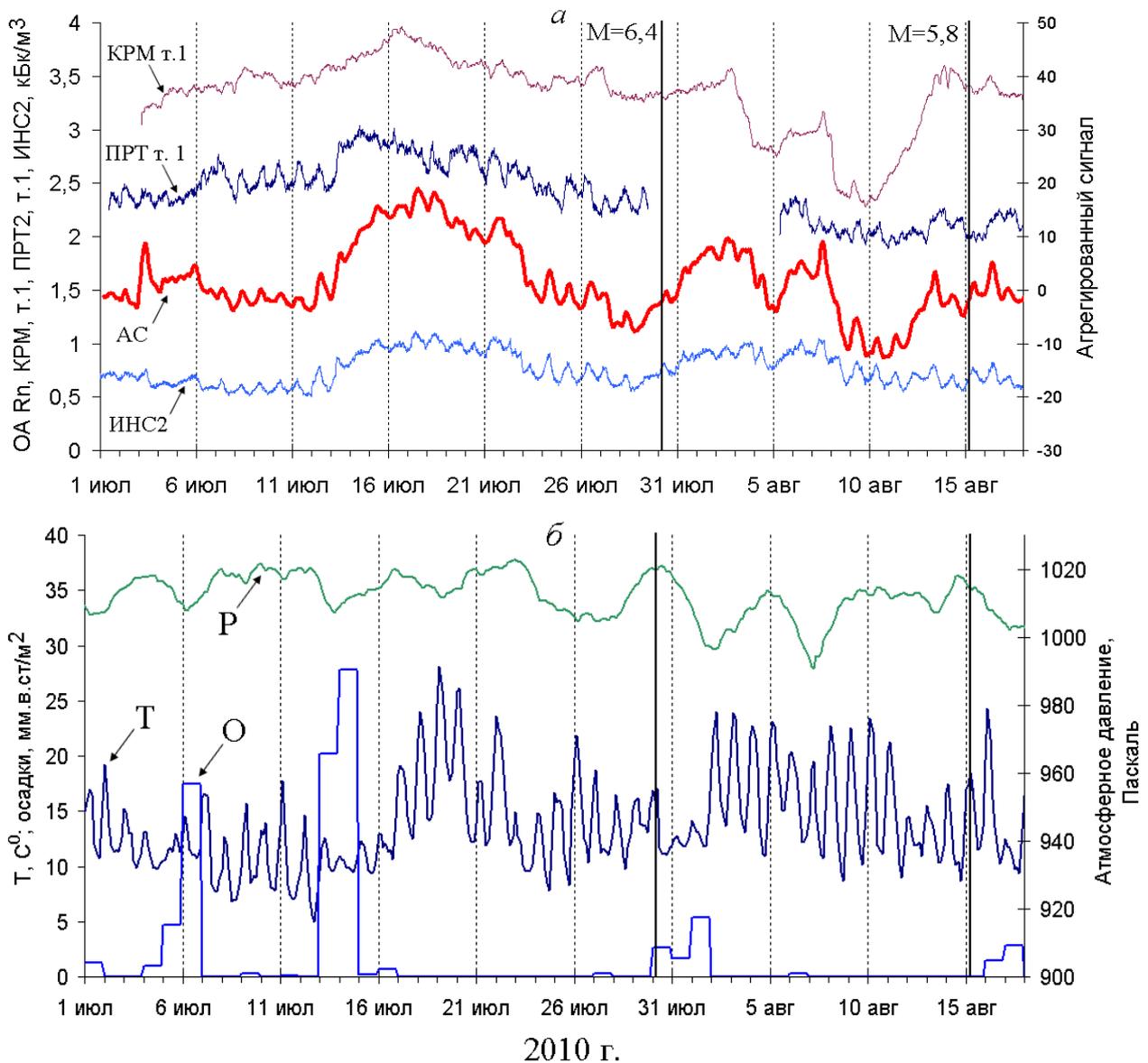


Рис. 4. а – динамика объемной активности радона в пунктах ИНС2 (воздух), КРМ, т.1, ПРТ2, т.1; агрегированный сигнал ОА Rn, построенный по четырем временным рядам данных пунктов КРМ (т.1, т.2), ИНС1, ИНС2; б – метеопараметры: О – осадки, Т – температура воздуха C^0 , Р – атмосферное давление.

На рис. 5 более детально представлена динамика ОА Rn в трех пунктах, образующих треугольник с апертурой $\sim 45,51$ км (КРМ, ИНС2, ПРТ2). Для выделения, с определенной долей условности, вступления аномалий и определения времени их запаздывания относительно первого пункта, которым явился КРМ, была произведена цифровая фильтрация полученных рядов данных фильтром нижних частот с бесконечной импульсной характеристикой (тип Баттерворта). После фильтрации для трех рядов данных была выполнена кросс-корреляция и определены временные задержки (лаги) вступления аномалий на каждом пункте регистрации (рис. 5).

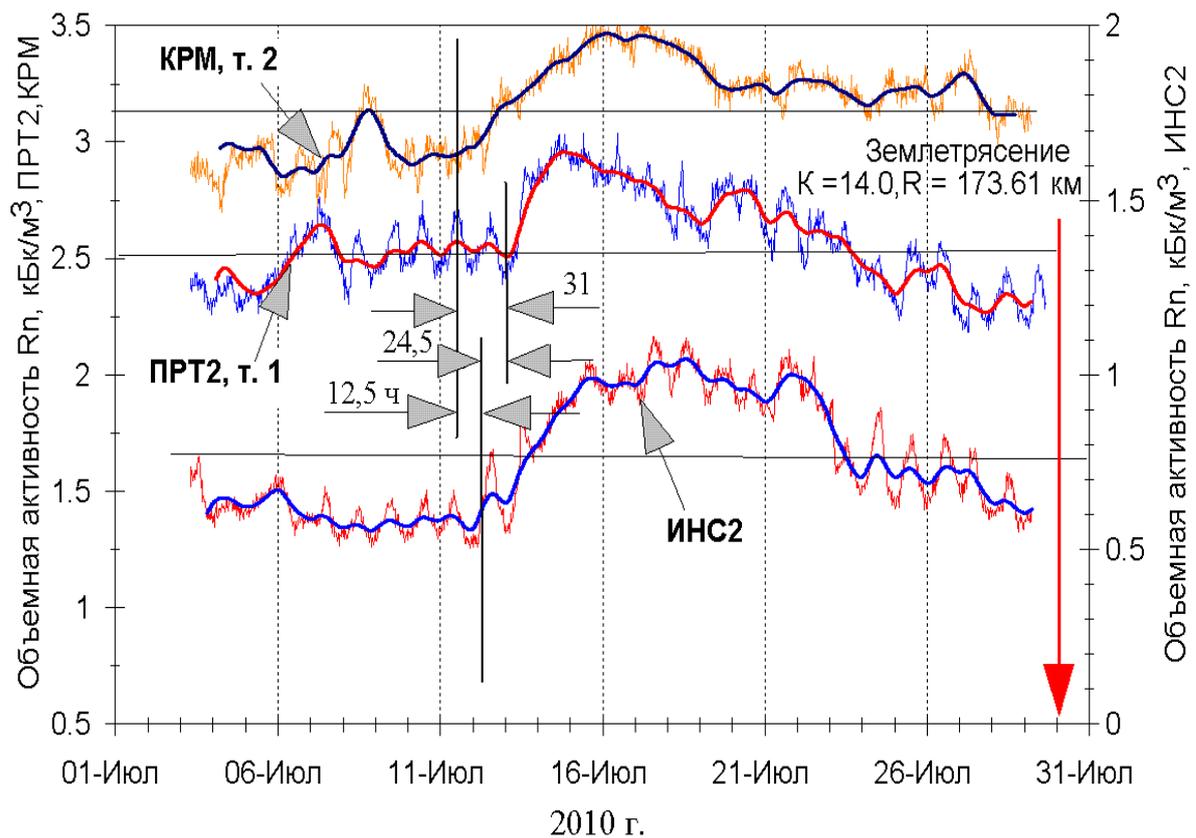


Рис. 5. Динамика объемной активности радона в пунктах ИНС2 (воздух), КРМ, т.2, ПРТ2, т.1, за период 1-31 июля. Вертикальными линиями показаны времена начала аномалий на каждой станции, цифрами указано время запаздывания начала аномалий относительно первой станции (КРМ).

Как показано в экспериментальной работе [1], резкие изменения напряженно-деформированного состояния контактов между блоками могут приводить к возникновению межблоковых перемещений, которые проявляются в виде «квазивязкого» течения материала земной коры. Вероятно, 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.

При допущении плоского фронта распространяющейся с постоянной скоростью волны, по разности запаздывания вступлений аномалий на пунктах регистрации рассчитан азимут ее прихода, который составил $142^{\circ} \pm 15^{\circ}$ (рис. 3). При этом скорость ее распространения составляет около 6,8 км/сут. Следует отметить, что в августе 2004 г. скорость распространения «геодеформационной волны» была значительно больше - 30 км/сут [7].

В исследованиях последних лет все чаще обращается внимание на изменения реологических свойств геоматериала в процессе подготовки землетрясений. В [3] показано, что в зоне будущего очага землетрясения хрупкому разрушению предшествует квазивязкое течение горных масс в результате ползучести (крипа). Предположим, что аномалия 11-29 июля является реакцией поля подпочвенного радона на деформирование блочных массивов горных пород в результате квазивязкого течения горных масс - «геодеформационная волна». Данное предположение основано на азимуте подхода аномалии на пункты регистрации радона, который близок к направлению на эпицентральную область роевой последовательности землетрясений 30 июля (Рис. 3). Эту аномалию можно рассматривать как предвестник роя землетрясений с упреждением 18 суток.

Заключение

На сети пунктов мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском полигоне в период 1 июля – 25 августа 2010 г. зарегистрировано бухтообразное возмущение. По временам его прихода на треугольник станций, оценен азимут на источник, который удовлетворительно совпадает с направлением на эпицентр главного толчка роевой последовательности. Выделенную аномалию следует рассматривать как отклик изменения массопереноса Rn в геосреде на «геодеформационную волну», обусловленную пластическими деформациями в зоне субдукции, возникающими на последней стадии подготовки сильных землетрясений.

Автор выражает признательность научному руководителю П.П. Фирстову за проявленное внимание и поддержку в процессе выполнения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Любушин А.А.(мл). Агрегированный сигнал систем низкочастотного геофизического мониторинга // Физика Земли. 1998. №1. С. 69 – 74.
3. Моргунов В.А. Крип горных пород на завершающей стадии подготовки землетрясений // Физика Земли. 2001. №4. С. 3 – 11.
4. Рудаков В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ// Автореферат на соискание степени доктора физико-математических наук. М. 1992 г.
5. 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.
6. 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.

7. Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П., Яковлева В.С., Исаев А.В., Мальшева О.П. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле - августе 2004 г. // Вулканонология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49-59.
8. Фирстов П.П., Пономарев Е.А., Чернева Н.В., Бузевич А.В., Мальшева О.П. К вопросу влияния баровариаций на поступления радона в атмосферу // Вулканонология и сейсмология. 2007. № 6. С.46-53
9. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканонология и сейсмология. 1997. № 4. С. 82–94.
10. Steinitz, G. A statistically significant relation between radon flux and weak earthquakes in the Dead Sea Rift Valley / G. Steinitz, Z.B. Begin, N. Gazit-Yaari // Geology. 2003. V.31. P. 505–508.

TIME VARIATION OF SUBSURFACE RADON ON THE PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKII GEODYNAMIC TEST SITE IN JULY-AUGUST 2010

Makarov E.O.

*Kamchatkan experimental & methodical seismological department,
Geophysical service, RAS*

The variation in the volumetric activity of radon in subsurface air at stations of the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic test site was compared with Southern Kamchatka seismicity. 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 variation in the volumetric activity of radon in subsurface air shows a precursor with advance time of 18 days of the July 30, 2010 earthquake swarm with the greatest magnitude $M_{\max} = 6.4$ and epicentral distances of about 173 km from the recording station.