



УДК 550.34

П. П. Фирстов, Е. О. Макаров, С. С. Сероветников

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

## Предвестниковые аномалии в радоновом и деформационном полях Земли перед землетрясением в Авачинском заливе с $M = 5,6$ , 15 октября 2012 г.

Выполнено сопоставление результатов наклономерных наблюдений с данными регистрации ОА Rn в почвенном воздухе в период перед землетрясением 15 октября 2012 г. с  $M = 5,6$ . В поле почвенного радона выделены аномальные возмущения перед землетрясением, на наклономерной станции зарегистрировано бухтообразное возмущение земной коры, по времени совпадающей с аномалией в почвенном радоне. Предположительно, обоими методами зарегистрирована «геодеформационная волна», по форме представляющая собой уединенную волну длительностью 4 суток с максимальной относительной деформацией грунта  $2 \cdot 10^{-6}$ , вызванная квазипластическим течением в зоне субдукции, которое предшествовало землетрясению.

### Введение

Исследования связи между концентрацией радона в почвенном воздухе и изменениями напряжённо-деформированного состояния геосреды с целью прогноза землетрясений усиленно ведутся в течение последних нескольких десятков лет во всех сейсмоактивных регионах Земли. В настоящей работе рассмотрены особенности отклика объёмной активности почвенного Rn (ОА Rn) на изменения напряжённо-деформированного состояния геосреды на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с подготовкой землетрясения с магнитудой  $M = 5,6$ , произошедшего 15 октября 2012 г., и выполнено сопоставление данных радонового мониторинга с результатами наклономерных наблюдений.

Объёмная активность радона в почвенном газе определяется скоростью конвективного переноса и диффузией в пористой среде — элювиально-делювиальных отложениях, в которых расположены датчики концентрации радона на всех пунктах регистрации. Оба параметра зависят как от метеорологических величин, так и изменений напряжённо-деформированного состояния геосреды. Поэтому сопоставление результатов наклономерных наблюдений с данными регистрации ОА Rn в почвенном воздухе представляет большой интерес для подтверждения влияния деформационных процессов на миграцию радона.

### Аппаратура и методика наблюдений

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне начиная с 1998 г. работает сеть пунктов регистрации ОА Rn в почвенном воздухе рыхлых отложений [5, 7, 8]. Пункты сети радонового мони-

торинга расположены в разных структурных элементах побережья Авачинского залива, что даёт основание предполагать различный отклик в динамике ОА Rn в зависимости от местоположения очагов землетрясений.

В качестве датчиков на всех пунктах используются газоразрядные счетчики типа СБМ-19, позволяющие вести пассивную регистрацию  $^{222}\text{Rn}$  по  $\beta$ -излучению продуктов его распада [5]. Как правило, в пунктах газоразрядные счётчики располагаются в зоне аэрации в заборных ёмкостях (ведро — 10 л) на глубинах один и два метра (к.1, к.2). В настоящее время почти все пункты сети оснащены современными регистрирующими приборами серии АЛМЕМО с коннекторами, позволяющими регистрировать одновременно количество импульсов со счётчиков и другие параметры (концентрация  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и метеорологические величины) [4]. На рис. 1 показан общий вид регистрирующего комплекта на базе АЛМЕМО 2690–8. Переход от концентрации к объёмной активности осуществляется по эмпирической формуле ОА Rn ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) =  $9N$ , где  $N$  измеряется в имп/мин.

В последние годы на Камчатке развернута сеть современных наклономерных станций [1] которая позволяет следить за поверхностными проявлениями деформаций земной коры. Для совместной обработки данных сети пунктов радонового мониторинга и наклономерных станций были взяты данные станции Петропавловск (РЕТТ) за период с 1 по 17 октября 2013 г., захватывающий период перед землетрясением в Авачинском заливе 15 октября 2012 г. с  $M = 5,6$ .

На наклономерной станции РЕТТ датчиком служит пузырьковый «безинерционный» сенсор АР-

Таблица 1. Характеристика станции наклономерных наблюдений.

Код станции	Координаты, высота	Сенсор/Регистратор/Датчик давления	Частота опроса, Гц	Диапазон измерения, mcR	Система передачи данных	Сквозность передачи данных
РЕТТ	53,023 с. ш. 158,650 в. д.	Applied Geomechanix 701-2A/(4X)DATAMARK LS7000XT/MPX-4115AP	100	±8000 mcR	Сеть КФ ГС РАН	1 мин.



Рис. 1. Общий вид регистрирующего комплекта на базе ALMEMO 2690-8: 1 — датчик CO<sub>2</sub>; 2 — газоразрядные счётчики SBM-19; 3 — датчик температуры; 4 — самописец ALMEMO 2690-8; 5 — двухканальный формирователь импульсов; 6 — водородный геофизический сигнализатор; 7 — аккумулятор

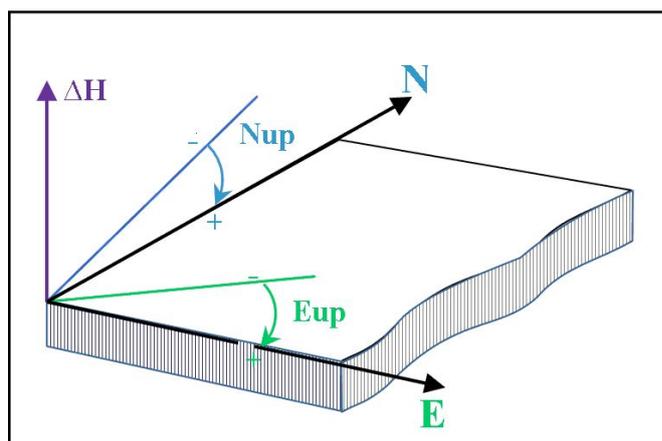


Рис. 2. Схема регистрации углов наклона сенсором APPLIED GEOMECHANIX 701-2 A(4X). *N* — направление юг-север, *E* — направление запад-восток, *Nup* — угол наклона в плоскости *N*, *Eup* — угол наклона в плоскости *E*,  $\Delta H$  — относительное линейное смещение точки наблюдений по высоте мм/км.

PLIED GEOMECHANIX 701-2 A(4X), с чувствительностью  $\sim 0,003$  mcR (табл. 1). Регистрация углов наклона производится по двум осям *Eup* (направление запад-восток) и *Nup* (направление юг-север) (рис. 2). С целью учёта влияния температуры и флуктуаций атмосферного давления наклономер оборудован датчиками температуры и атмосферного давления.

Обработка данных наклономерной станции осуществляется по алгоритму, описанному в работе [1].

### Сейсмичность Авачинского залива в сентябре-октябре 2012 г. и её проявление в поле почвенного радона и деформациях земной поверхности

Из 12 землетрясений с магнитудой  $M > 5,5$  (NEIC), произошедших в районе Камчатки в 2012 г., предвестниковая аномалия в поле почвенного радона отмечена только для одного, произошедшего 15 октября, очаг которого располагался на глубине 45 км в Авачинской заливе на расстоянии 140 км от опорного пункта ПРТ (табл. 2). Следует отметить, что с 5–21 сентября прошёл рой слабых землетрясений с  $K < 10,5$  в районе Авачинской котловины

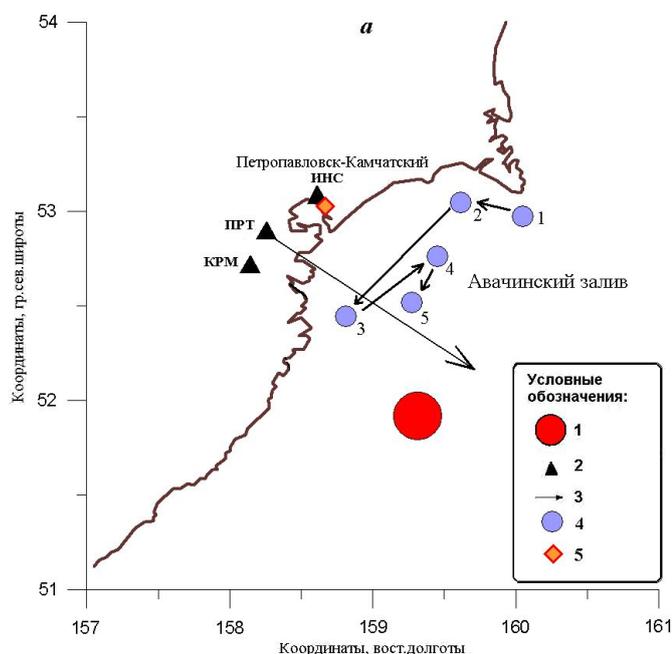
на глубинах 90–100 км (рис. 3). Авторы предполагают, что этот рой можно отнести к форшоковому процессу перед землетрясением 15 октября.

В динамике ОА Rn в период с 7 по 11 октября на всех пунктах выделяются положительные бухтообразные возмущения, свидетельствующие об увеличении ОА Rn (рис. 4). С целью выявления общих элементов поведения в динамике ОА Rn на основе десяти рядов данных построен агрегированный сигнал для многомерного ряда по методике [2], на котором достаточно чётко выделяется аномалия 7–11 октября, превосходящая фон более чем на порядок (рис. 4г).

С целью выделения вступления аномалии на каждой станции и определения времени их запаздывания относительно первого пункта (ИНС) выполнялась барокомпенсация на флуктуации атмосферного давления и фильтрация колебаний, обусловленных суточным ходом температуры. По максимуму коэффициента кросс-корреляции между временными рядами пунктов, образующих треугольник с апертурой  $\sim 45$  км, определялась разность вступлений

Таблица 2. Основные параметры землетрясений с  $M > 5,5$ , произошедших в районе Камчатки в 2012 г.

№	Дата	Время	Координаты		M (NEIC)	Глубина	Расстояние до ПРТ, км	Предвестник
			гр. с. ш.	гр. в. д.				
1	14.04.2012	15:13:14	49,38	155,65	5,6	90	430	-
2	23.04.2012	22:40:22	48,40	154,74	5,6	31	560	-
3	24.06.2012	3:15:01	57,60	163,20	6	10	600	-
4	16.07.2012	3:08:31	55,78	161,23	5,5	85	360	-
5	20.07.2012	6:10:25	49,41	155,91	6	19	420	-
6	20.07.2012	6:32:56	49,35	156,13	5,8	10	420	-
7	14.10.2012	9:41:58	48,31	154,43	5,7	35	580	-
8	15.10.2012	1:19:03	51,90	159,38	5,6	21	140	+
9	16.10.2012	12:41:25	49,62	156,44	5,6	81	390	-
10	02.11.2012	1:52:03	55,89	162,80	5,5	9	440	-
11	16.11.2012	18:12:39	49,28	155,43	6,5	29	450	-
12	17.12.2012	0:28:58	49,79	155,84	5,6	68	390	-



**Рис. 3.** Схема расположения наклонномерной станции, сети пунктов радонового мониторинга и карта эпицентров землетрясений, произошедших в Авачинском заливе в сентябре – октябре 2012 г.: 1 – эпицентр землетрясения 15 октября 2012 г.; 2 – пункты радонового мониторинга; 3 – азимут на источник «геодеформационной волны»; 4 – эпицентры землетрясений с  $8,5 \leq K \leq 10,2$ ,  $90 \leq H \leq 102$  км (5–21 сентября 2012 г.); 5 – наклонномерная станция РЕТТ. НИС – пункт на скважине вблизи здания ИВиС, ПРТ – пункт в поселке Паратунка; КРМ – пункт в долине реки Карымшина

бухтообразных возмущений, как это делалось ранее [3, 8].

При допущении плоского фронта возмущения («геодеформационная волна»), распространяющегося с постоянной скоростью, рассчитывался азимут

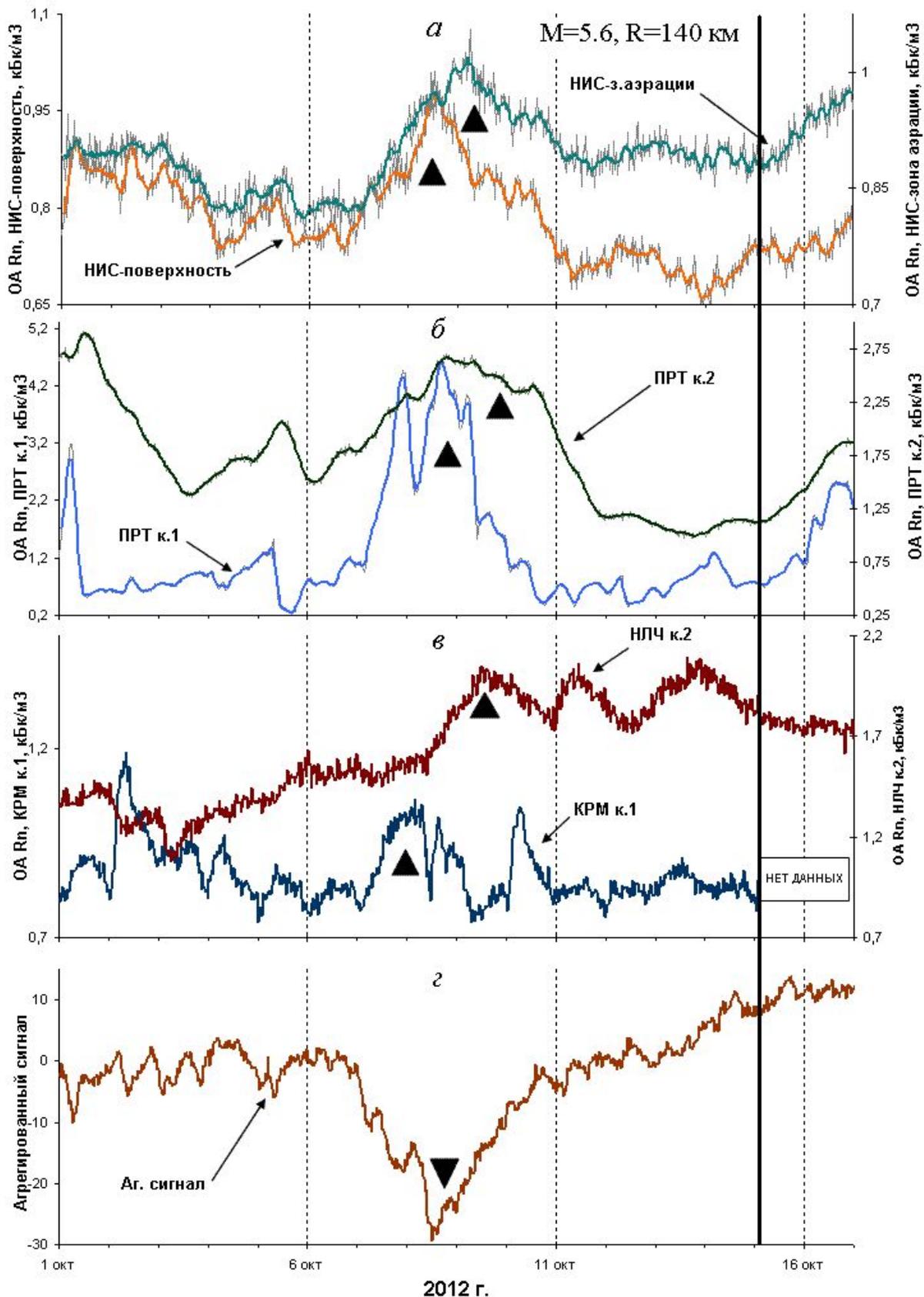
на источник и угол выхода волны. Как видно на рис. 3, азимут на источник имеет довольно близкое направление на эпицентр землетрясения, а угол выхода составил  $54^\circ$ . При этом кажущаяся скорость распространения фронта «геодеформационной волны» оценена в 104 км/сут.

Для обработки наклонномерных данных станции РЕТТ был взят временной ряд с 1–17 октября 2012 г., охватывающий период землетрясения в Авачинском заливе 15 октября 2012 г. с  $M = 5,6$ . На рис. 5 приведены исходные данные, отфильтрованные данные, на которых сняты воздействия вариаций атмосферного давления и температуры, и модельные кривые. На модельных кривых хорошо выражены бухтообразные возмущения с периодом  $T \sim 4$  суток, которые отразили деформационный процесс, характеризующийся плавным поднятием станции начиная 7 октября и с последующим опусканием до исходных значений 11 октября 2012 г. с максимальной относительной деформацией грунта  $2 \cdot 10^{-6}$ .

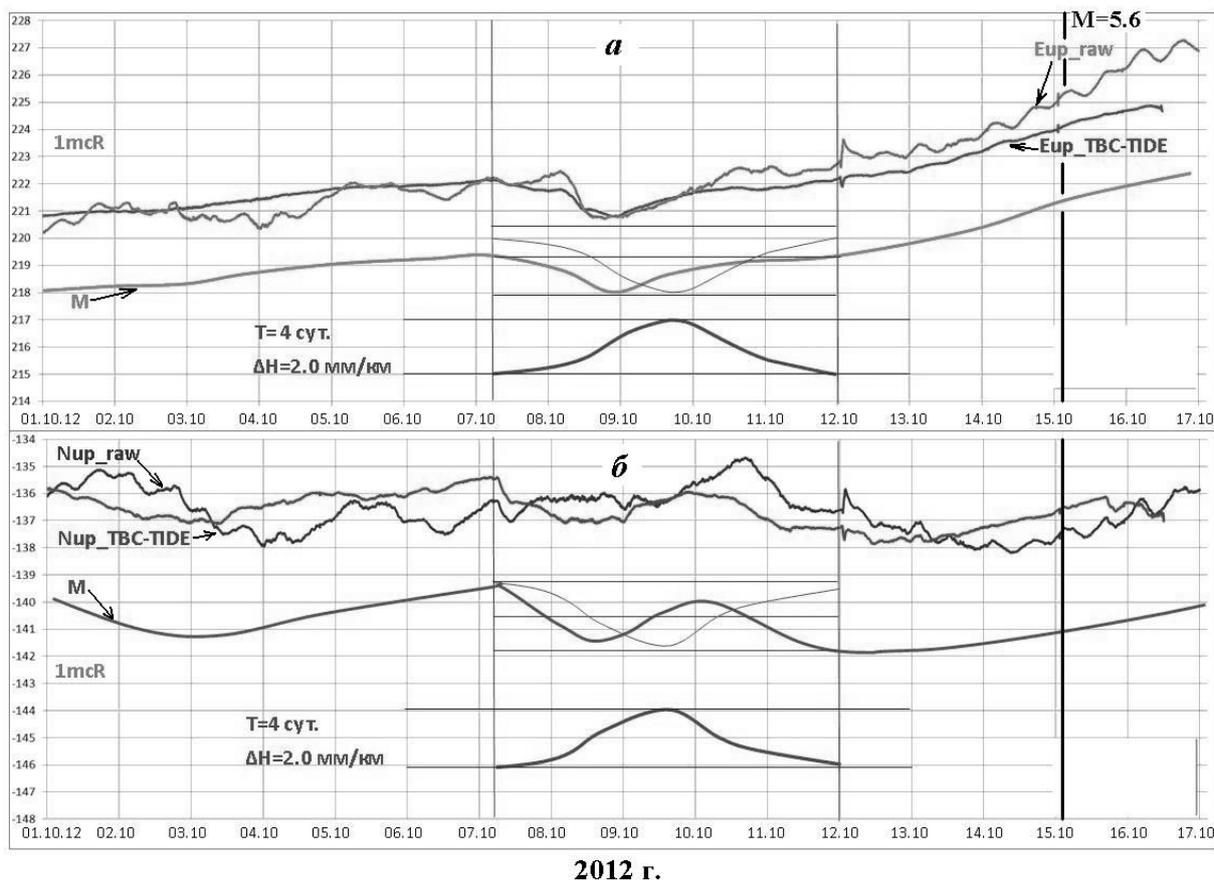
Таким образом, обоими методами зарегистрирована «геодеформационная волна», по форме представляющая уединенную волну длительностью около 4 суток

### Обсуждение результатов

Встаёт вопрос – где находится источник квазипластического течения геоматериала, породивший «геодеформационную» волну. Рассмотрим поперечный разрез фокальной зоны для района северной части Авачинского залива по С. А. Федотову и др. [6], на котором показаны очаги землетрясений с энергетическим классом  $K > 8,5$ , 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. Обращает на себя внимание, что как очаг



**Рис. 4.** Динамика OA Rn в пунктах сети: а – НИС (зона аэрации, поверхность; б – ПРТ, к.1, к.2; в – НЛЧ, КРМ; г – агрегированный сигнал, построенный по десяти временным рядам данных. Треугольником отмечена фазовая корреляции сигналов. Тонкими серым линиями показаны данные после барокомпенсации, жирной линией отображены данные после осреднения скользящим средним. Сплошной вертикальной линией отмечен момент возникновения землетрясения 15 октября 2012 г. с  $M = 5,6$  и эпицентрального расстоянием до опорного пункта ПРТ  $R = 140$  км.



**Рис. 5.** Результаты обработки данных наклономерной станции РЕТТ. а: Eup\_raw — исходные данные (З-В), Eup\_TBC-TIDE — отфильтрованные данные канала (исключены внешние воздействия),  $M$  — моделирующая кривая; б: Nup\_raw — исходные данные (С-Ю), Nup\_TBC-TIDE — отфильтрованные данные канала,  $M$  — моделирующая кривая. Масштаб клетки по оси  $Y$  — 1 мсР.  $\Delta H$  — кривая относительного линейного движения станции по вертикали, жирная вертикальная линия — землетрясение 15 октября 2012 г.

землетрясения 1952 г., так и очаг рассматриваемого землетрясения приурочены к границе Мохоровичича.

Форшоки землетрясения 15 октября 2012 г. образуют компактную область на внутренней границе зоны Беньофа-Заварицкого, причём направление на неё в вертикальной плоскости от ПРТ близко к углу выхода «геодеформационной волны». Это даёт основание предположить, что в данном месте произошло квазипластичное течение геоматериала.

Исходя из предшествующих работ [3, 8], скорость геодеформационной волны можно оценить в пределах 20–28 км/сут, тогда при расстоянии 140 км от опорного пункта ПРТ до области источника возмущения, время её пробега составит 5–7 суток. Последовательность сейсмических событий в сентябре–октябре 2013 г. и их отражение в радоновом и деформационном полях показана на рис. 7.

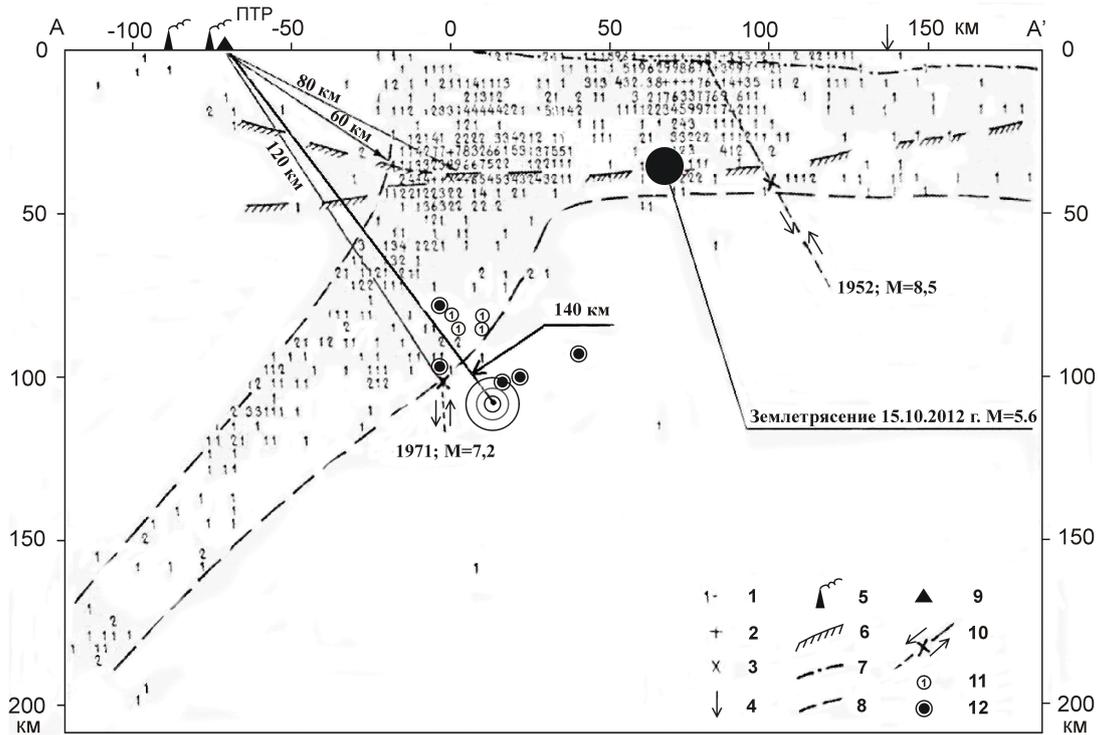
### Заключение

На сети пунктов мониторинга почвенного радона на Петропавловск-Камчатском полигоне перед зем-

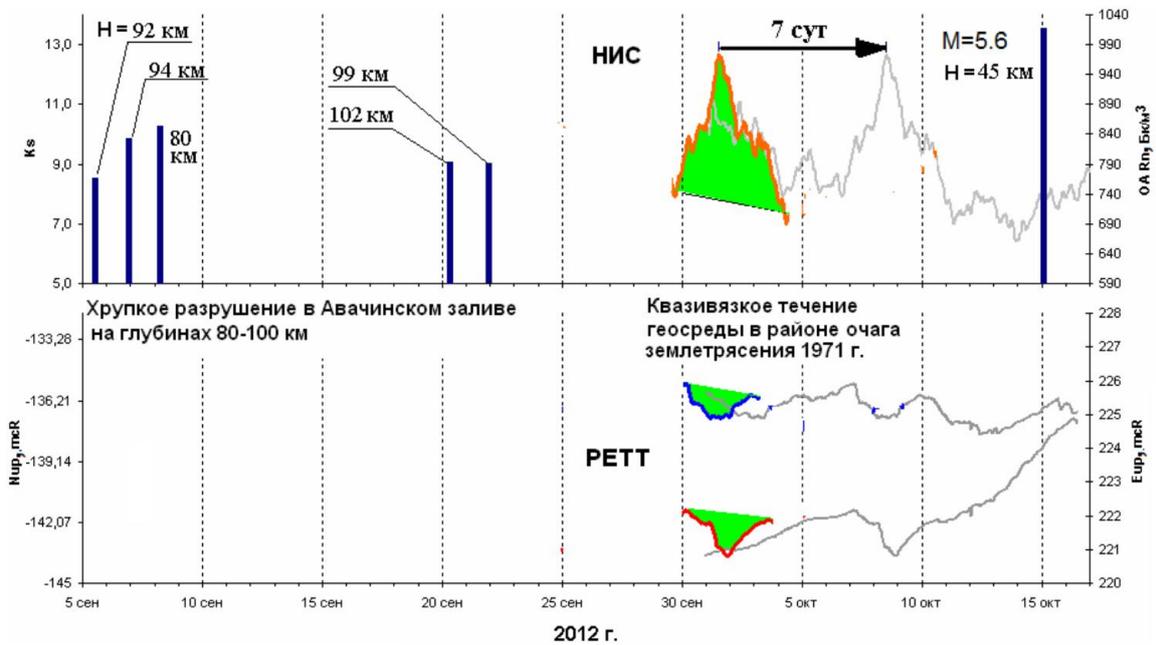
летрясением с  $M = 5,6$  с эпицентром в Авачинском заливе зарегистрированы аномальные возмущения, превосходящие на 30–50% уровень фона. По временам прихода вступлений аномалий на треугольник станций, определён азимут на источник, который удовлетворительно совпадает с направлением на эпицентр землетрясения. Чёткое выделение аномалии в агрегированном сигнале многомерного ряда по данным радонового мониторинга можно рассматривать как краткосрочный предвестник землетрясения с  $M = 5,6$  с временем упреждения 9 суток.

На наклономерной станции РЕТТ зарегистрировано бухтообразное возмущение земной коры с максимальным наклоном 1,5 мсР, по времени совпадающей с аномалией в почвенном радоне. Предположительно, обоими методами зарегистрирована «геодеформационная волна», по форме представляющая собой уединённую волну длительностью 4 суток с максимальной относительной деформацией грунта  $2 \cdot 10^{-6}$ .

Аномалии в поле почвенного радона рассматриваются как отклик на деформирование блочных массивов горных пород в результате прохождения



**Рис. 6.** Поперечный разрез фокальной зоны для района северной части Авачинского залива по С. А. Федотову и др. [6]. Землетрясения  $K \geq 8,5$  за 1962–1981 гг. 1–3 число землетрясений в прямоугольнике  $6,25 \times 10,5 \text{ км}^2$ : от 1 до 9; от 10 до 20; от 21 до 30 соответственно. 4 – ось глубоководного жёлоба; 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  $K = 8,5 - 10,2$  (5–21 сентября 2012 г.).



**Рис. 7.** Последовательность сейсмических событий в сентябре – октябре 2012 г. и их отражение в радоновом и деформационном полях.

«геодеформационной волны». По-видимому, выделенная «геодеформационная волна» вызвана квази-пластическим течением в зоне субдукции, которое предшествовало землетрясению в результате изменения напряжённо-деформированного состояния геосреды в зоне Беньюфа-Заварицкого на глубинах около 100 км.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ №12-05-31 319/12 «мол\_а».

### Список литературы

1. Левин В. Е., Бахтияров В. Ф., Титков Н. Н. и др. Мониторинг и исследование современных движений земной коры на Камчатке. Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: Новая Книга, 2012. С. 188-208.
2. Любушин А. А. (мл). Агрегированный сигнал систем низкочастотного геофизического мониторинга // Физика Земли, 1998. № 1. С. 69-74.
3. Макаров Е. О. Динамика подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне перед сильными землетрясениями с  $M > 5,5$  района Авачинского залива. XIII Уральская молодежная научная школа по геофизике 23-27 апреля 2012 г. Сборник докладов. Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2012. С. 125-127.
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. Том. 48, № 2. С. 5-14.
5. Рудаков В. П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ: Автореферат на соискание степени доктора физико-математических наук. М. 1992 г.
6. Федотов С. А., Шумилина Л. С., Чернышева Г. В. Сейсмичность Камчатки и Командорских островов по данным детальных исследований. // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 29-60.
7. Фирстов П. П. Мониторинг объёмной активности подпочвенного радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) на Паратунской геотермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 1-11.
8. 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. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 154-158.
9. 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.
10. Фирстов, П. П., Широков В. А., Руленко О. П. и др. О связи динамики подпочвенного радона ( $^{222}\text{Rn}$ ) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле-августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49-59.