

УДК 550.348

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА В 1997–2000 гг. НА ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

© 2002 г. П. П. Фирстов¹, В. П. Рудаков²

¹Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 383006

²Институт сейсмологии ОИФЗ РАН, Москва, 117296

Поступила в редакцию 20.03.2001 г.

Дано описание феноменологической модели динамики поля подпочвенного радона тектонических нарушений. С позиции этой модели рассмотрены результаты регистрации объемной активности радона (ОА Rn) в подпочвенном воздухе на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне за три годовых цикла 1998–2000 гг. Регистрация ОА Rn в этот период проводилась в долине ручья Коркина (Паратунская гидротермальная система) в двух разноглубоких точках (1 и 3 м), а также длительностью до полугода еще в 4 пунктах полигона с различными геолого-тектоническими условиями. На основании анализа сезонных вариаций в динамике ОА Rn перед сильными землетрясениями, происшедшими в Авачинском заливе 01.06.1998 г. ($M_{wOBN} = 6.9$, $R = 136$ км) и 8.03.1999 г. ($M_{wOBN} = 7.0$, $R = 127$ км), выделены превышения ОА Rn до 30% и длительностью 0.23 и 0.44 года. Эти превышения ОА Rn, по-видимому, можно рассматривать как предвестниковые аномалии, что подтверждается еще рядом фактов.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые идея о целесообразности использования изменений химического состава подземных вод и подпочвенного газа перед землетрясениями для их прогноза была высказана в начале XX в. основоположником русской сейсмологии Б.Б. Голицыным. Но лишь только после 1966 г., когда ретроспективно была установлена изменчивость химического и газового состава подземных вод и выявлены геохимические аномалии, предшествовавшие Ташкентскому землетрясению [16], началось бурное развитие геохимических методов прогноза землетрясений в СССР [2, 3], а затем и в других странах. Основному толчку Ташкентского землетрясения предшествовало закономерное многолетнее изменение в динамике объемной активности радона (ОА Rn), растворенного в воде. В дальнейшем по аналогии были сделаны успешные прогнозы наиболее сильных его афтершоков [16]. Возникновения предвестниковых аномалий в динамике ОА Rn объяснялись уникальной ситуацией, связанной с тем, что измерения ОА Rn проводились в воде артезианской скважины, находившейся практически в эпицентре землетрясения. Совпадение пункта регистрации с эпицентром землетрясения является исключительным случаем, и вероятность такого повторения весьма мала.

Начиная с 1970-х годов XX в исследования в этом направлении проводились в Китае [26, 27], Японии [25], США [20, 21], России и в других странах [19], а после некоторого затишья с середины 80-х годов новый всплеск работ в проведении ра-

донового мониторинга с целью прогноза сильных землетрясений начался в конце 1990-х годов. Причем работы стали проводиться и в таких развивающихся странах, как Индия [23, 24], Алжир [18], Сирия [17].

Первые работы по регистрации Rn на Камчатке были выполнены в 1970-е годы XX в., но планомерные исследования поля подпочвенного радона с целью поиска предвестников сильных землетрясений начались лишь в конце 1997 г. [15]. Катастрофические землетрясения в северо-западной части Тихоокеанского сейсмического пояса, принешие значительные разрушения и человеческие жертвы, в г. Кобе (Япония 1995 г.) и в Нефтегорске (о-в Сахалин 1995 г.), а также повышенная вероятность сильного землетрясения в Авачинском заливе по долгосрочному прогнозу С.А. Федотова [14] стимулировали развитие этих работ.

Феноменологическая модель динамики поля подпочвенного радона тектонических нарушений. Эманационная съемка как радоновый метод поиска и исследования радиоактивных объектов стала применяться в геологоразведке еще в начале двадцатых годов XX в. [4]. Это предопределило появление теоретических и экспериментальных работ, свидетельствующих о достаточно ограниченном пути миграции радиоактивных эманаций (порядка 10–15 м), определяемом диффузионными свойствами пород чехла рыхлых отложений и временем полного распада Rn [7].

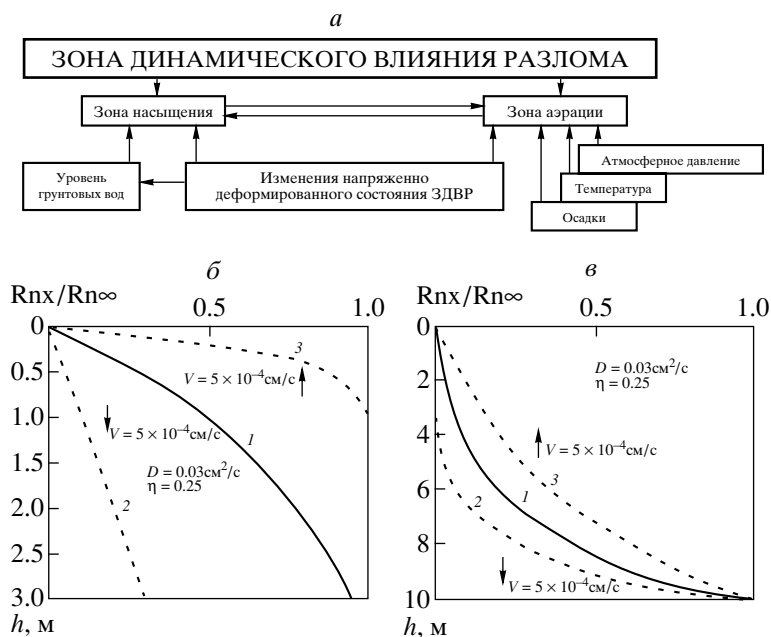


Рис. 1. Блок-схема причинно-следственных связей массопереноса R_n к дневной поверхности для феноменологической модели динамики подпочвенного R_n в зоне динамического влияния разлома (а), кривые распределения концентрации R_n в зоне аэрации [22] для случая с распределенными параметрами (б) и случая с сосредоточенными параметрами радиосодержащих минералов (в).

Дальнейшие исследования с использованием новых аппаратно-методических разработок эманационного метода и особенно применение его для прогноза землетрясений [21] привели к разработке новых теоретических подходов для обоснования наблюдаемых аномальных вариаций в поле подпочвенного R_n в координатах пространство – время – напряженное состояние горных пород.

Феноменологически обоснованное представление о процессах, формирующих отклик эманационных полей в тектонически-разуплотненных участках земной коры на изменение ее напряженно-деформированного состояния, дано в работе В.П. Рудакова [11] с наиболее полным развитием этих представлений в [10].

Согласно этим представлениям, тектонические нарушения (разломы, трещины разного порядка) в зонах растяжения могут рассматриваться как открытые флюидонасыщенные коллекторы, являющиеся местом разгрузки подземных водоносных горизонтов, через которые осуществляется газообмен с атмосферой Земли, контролируемый изменениями напряженно-деформированного состояния пород региона.

Для поисков гидрогеохимических предвестников представляет интерес не только зона тектонического нарушения (разлом), но и вся зона динамического влияния разлома (ЗДВР), под которой подразумевается область деформирования, связанная с формированием разлома и образова-

нием в ее осадочном чехле разноориентированных флюидопроводящих каналов. По вертикали в ЗДВР выделяются две зоны: 1 – зона аэрации; 2 – зона насыщения, под которой подразумевается суммарная мощность гидравлически связанных разломов водоносных горизонтов.

Данное представление зоны тектонического нарушения, определяющее в ней динамику эманационного поля, получило экспериментальное подтверждение как в лабораторных, так и в натуральных экспериментах. В этих экспериментах было показано, что реакцией зоны насыщения на изменения напряженно-деформированного состояния земной коры является изменение уровня поверхности открытого водоносного горизонта, которое, в свою очередь, влияет на динамику газопереноса в зоне аэрации [10]. Кроме того, на массоперенос R_n в зоне аэрации значительное воздействие оказывают атмосферное давление, температура воздуха, осадки. Поэтому динамика поля радона в зоне аэрации (подпочвенного радона) в основном определяется указанными выше причинами, что показано на блок-схеме причинно-следственных связей массопереноса радона к дневной поверхности феноменологической модели динамики подпочвенного R_n в ЗДВР (рис. 1а).

Классическая теория эманационного метода рассматривает массоперенос радона в рыхлых отложениях как некий установившийся диффузион-

но-конвективный процесс, который описывается следующим уравнением [7]:

$$\eta \frac{dRn}{dt} = D \frac{d^2 Rn}{dx^2} + v \eta \frac{dRn}{dx} - \eta Rn \lambda + Q; \quad (1.1)$$

где Rn – концентрация радона в единице объема порового пространства, Ku/cm^3 ; $\eta \zeta$ – пористость горной породы; D – коэффициент диффузии, cm^2/c ; λ – постоянная распада эманаций, c^{-1} ; v – скорость конвективного переноса, cm/c ; $Q = \frac{aRn\rho\lambda}{\eta}$ скорость выделения эманаций в поровое пространство в единице объема среды, Ku/cm^3 , Ra – количество радия в породе, $г$; ρ – плотность породы, $г/cm^3$; 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, то при переносе Rn в условиях зоны аэрации ЗДВР, при длительном периоде наблюдений, они могут изменяться под действием гидрогеологических, 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 гелиотермозоны. Зависимость коэффициента диффузии от температуры рыхлых отложений, в соответствии с кинетической теорией газов оценивается соотношением:

$$D = D_0(T^k/273)^\alpha,$$

где T^k – температура по шкале Кельвина; D_0 – коэффициент диффузии при нормальных условиях; α – константа, значение которой часто принимаются равным 0.5.

Существенное влияние на скорость диффузии оказывает влажность. При увеличении влажности скорость диффузии резко уменьшается, и при полном увлажнении диффузия Rn практически прекращается. По данным [10], при влажности пород до 6% коэффициент диффузии меняется незначительно (в пределах $6-7 \times 10^{-2} cm^2/c$); при влажности до 15% составляет $1 \times 10^{-2} cm^2/c$; а при влажности 17% уже составляет $5 \times 10^{-3} cm^2/c$. При полном увлажнении (~20–25%) коэффициент диффузии достигает величины, характерной для диффузии эманации Rn в воде $\sim 10^{-5} cm^2/c$.

Скорость конвективного переноса (v) обусловлена движением газовых потоков под действием перепада давления, который определяется атмосферным давлением и колебаниями уровня открытой поверхности зоны насыщения. Ско-

рость конвективного переноса в проницаемых тектонических нарушениях, связанная с “падением” уровня открытой поверхности зоны насыщения (“засасыванием”), меняется в пределах $1.5-6.2 \times 10^{-6} m/c$ (13–54 см/сут), что близко к скорости конвективного переноса эманации в естественном залегании.

Скорость радоновыделения (Q) зависит от содержания радия в породах, их плотности и пористости, а также от их эманационной способности (коэффициента эманирования). Временная изменчивость скорости радоновыделения прежде всего определяется коэффициентом эманирования и пористостью отложений. Оба параметра, при прочих равных условиях, определяются вариациями влажности рыхлых отложений, которая влияет как на выход эманаций в поровое пространство, так и на его объем. Эманационная способность радиоактивных составляющих рыхлых отложений зависит от температуры гелиотермозоны, что определяет сезонные вариации в поле подпочвенного радона.

Амплитуда и длительность вариаций концентрации Rn в подпочвенном газе находятся в определенной зависимости как от флюидодинамических свойств среды, так и от условий формирования эманационного поля в рыхлых отложениях. Последнее обусловлено, прежде всего, характером распределения в них радийсодержащих минералов. Согласно феноменологической модели динамики радонового поля тектонических нарушений, для описания аномалий эманационного поля на качественном уровне могут быть применимы два наиболее распространенных случая распределения радона в рыхлых отложениях в стационарных условиях [7]: 1) случай с распределенными параметрами – перенос подпочвенного радона происходит в условиях рыхлых отложений с однородным кларковым содержанием радиоактивных элементов; 2) случай с сосредоточенными параметрами – перенос эманаций осуществляется через слой отложений от обогащенного радием рудного пласта, либо от водоносного слоя минерализованных радоновых вод.

В реальных условиях величины D , v и Q не являются константами и уравнение (1.1) не имеет решения. Если принять в какой-то момент постоянство этих величин, то решением уравнения (1.1) для первого случая при условии $v \neq 0$ будет [7]:

$$Rn = \frac{Q}{\lambda \eta} \left[1 - e^{-\left(\frac{v \eta}{2D} - \sqrt{\left(\frac{v \eta}{2D} \right)^2 + \frac{\lambda \eta}{D} x} \right)} \right], \quad (1.2)$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} Rn = 0, & \text{при } x = 0 \\ Rn = Q/\lambda \eta & \text{при } x = \infty. \end{cases}$$

Для второго случая решение уравнения (1.1) при условии $v \neq 0$ запишется в виде [7]:

$$Rn = Rn_0 e^{\frac{v\eta}{2D}(l-x)} \frac{\text{sh} \left[\sqrt{\left(\frac{v\eta}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\eta}{2D}} x \right]}{\text{sh} \left[\sqrt{\left(\frac{v\eta}{2D}\right)^2 + \frac{\lambda\eta}{2D}} l \right]}, \quad (1.3)$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} Rn = 0 & \text{при } x = 0 \\ Rn = Rn_0 & \text{при } x = l, \end{cases}$$

где l – глубина залегания эманулирующего объекта.

Если принять в уравнениях (1.2) и (1.3) $v = 0$ и $\bar{\lambda} = \lambda\eta$, то получим простые выражения для зависимости уменьшения концентрации радона при его движении к земной поверхности:

$$\text{для первого случая} \quad Rn = \left(1 - e^{-x\sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{D}}} \right); \quad (1.4)$$

$$\text{для второго случая} \quad Rn = Rn_0 \frac{\text{sh} \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{D}}(l-x)}{\text{sh} \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{D}}l}. \quad (1.5)$$

На рис. 1б и 1в показаны зависимости распределения концентрации радона в верхней части рыхлых отложений, вычисленные по формулам (1.2)–(1.5) для среды с параметрами $D = 0.03 \text{ см}^2/\text{с}$, $v = 0.25$ и трех значений скорости конвективного переноса v : 1–0 см/с; 2 – (-5×10^{-4}) см/с; 3 – 5×10^{-4} см/с [22]. В первом случае увеличение концентрации эманаций с глубиной приводит экспоненциально и, в зависимости от коэффициента диффузии, выходит на асимптоту на глубинах 5–7 м. Из кривых рис. 1б ясно видно, что в этом случае при возникновении конвективного потока, принудительно воздействующего на перенос эманаций в сторону дневной поверхности, аномальное значение концентрации эманаций на глубине режимных измерений (1–2 м) не может превысить 3–4-кратной величины фонового уровня.

Во втором случае увеличение концентрации Rn с глубиной следует гиперболическому синусу, стремясь к максимальным значениям на “подошве” неактивного слоя рыхлых отложений мощностью l , над рудным пластом или над высокоминерализованными радоновыми водами, где концентрация Rn может не несколько порядков превышать его концентрацию, регистрируемую в спокойный период на глубине 1–2 м. В этом случае при возникновении конвективного потока аномальное значение концентрации Rn на глубине 1–2 м, в зависимости от содержания радия и глубины зале-

гания “рудного тела”, может в десятки раз и более превысить фоновый уровень (рис. 1в).

Анализ причин нестационарности процесса переноса эманаций в зоне аэрации тектонических нарушений указывает на ее связь с характером движения потока подпочвенных флюидов. Поэтому, в зависимости от типа распределения концентрации эманаций с глубиной в рыхлых отложениях, характера и скорости конвективного потока, будут формироваться форма и амплитуда отклика подпочвенного Rn на изменения напряженно-деформированного состояния ЗДВР и атмосферного давления.

Рассмотрим взаимодействие зоны насыщения и зоны аэрации в ЗДРВ. Принудительный перенос эманаций в зоне аэрации происходит как следствие перепадов давления, вызываемых колебаниями атмосферного давления и открытой поверхности подземных вод зоны насыщения тектонических нарушений. В связи с тем, что мощность зоны аэрации над открытой поверхностью водоносного горизонта не превышает первых десятков метров, а, следовательно, градиент атмосферного давления очень мал, и относительное перемещение столба воздуха в поровом пространстве зоны аэрации почти равно относительному перемещению уровня открытой поверхности водоносного горизонта. Поэтому изменение гидродинамического режима в тектоническом нарушении приводит к колебаниям поверхности зоны насыщения, что, в свою очередь, вызывает соответствующие перемещения столба атмосферы в рыхлых отложениях зоны аэрации и изменения изоконцентраций Rn .

В зоне насыщения, расположенной ниже открытой поверхности водоносного горизонта, условия миграции радона значительно отличаются от рассмотренных выше условий переноса Rn в рыхлых необводненных отложениях. В зоне насыщения образование и перенос Rn осуществляется в условиях гидростатического давления при весьма низких значениях коэффициента диффузии. Поэтому основными механизмами миграции Rn к земной поверхности являются перенос его в растворенной форме с подземными водами и вспутное всплывание с растворенными в воде газами при нарушении фазового равновесия в системе “газ-вода-порода” [10].

Рассмотренные выше представления об условиях пространственно-временного формирования динамики эманационных полей были положены в основу методологии исследования вариаций подпочвенного Rn в 1998–2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне.

Аппаратура и методика наблюдений. Исходя из феноменологической модели отклика поля подпочвенного Rn на изменения напряженно-деформированного состояния среды, для установки

первой станции была выбрана Паратунская гидротермальная система (пос. Паратунка), которая располагается в районе одноименного грабена с мозаично-блоковой структурой верхнего яруса земной коры [12]. Расположение пункта регистрации в зоне грабена с блоковой структурой с преобладающими напряжениями растяжения и приуроченностью его к хорошо развитой гидротермальной системе должны увеличивать геохимическую чувствительность выбранного пункта к геодеформационным процессам перед сильными землетрясениями Камчатки. С ноября 1997 г. в пос. Паратунка начала работать станция мониторинга подпочвенного радона, которая была расположена в узкой (300–400 м) долине ручья Коркина, трассирующей разлом. В 700 м от станции ниже по течению ручья находятся естественные выходы термальных вод с содержанием растворенного Rn до 1500 Бк/м³.

Регистрация на станции Паратунка (ПРТ) ведется в двух разноглубоких точках. Точка 1 (т. 1) расположена на подрезанном склоне долины ручья Коркина, на глубине одного метра от дневной поверхности. Точка 2 (т. 2) удалена на 25 м от т. 1 по направлению к ручью и находится на один метр выше дна бункера глубиной в три метра, вырытого в глинисто-аллювиальных отложениях речной долины.

На первом этапе (ноябрь 1997 – декабрь 1999 гг.) регистрация ОА Rn велась с принудительным пробоотбором поисковым α -радиометром РГА-01 с детектором на сцинтилляторе $ZnS(Ag)$. Два раза в сутки (~00 ч и ~12 ч местного времени) оператор отбирал подпочвенный газ из шпура и проводил замер в первую минуту после введения пробы. Погрешности измерения составляла не более 20%. Одновременно с помощью барометра измерялось атмосферное давление. По аналогичной методике с 01.01. по 07.07.1999 г. проводились наблюдения на Налычевском (НЛЧ) геотермальном месторождении. Подпочвенный газ отбирался о очень пористых травертиновых отложениях с повышенным содержанием радия [8]. Разница по глубине между точками отбора составляла 1.5 м.

С октября 1999 г. стали вводиться в эксплуатацию измерители вариации подпочвенного радона (РЕВАР), использующие пассивной (без пробоотбора) способ измерений на основе камеры с электростатическим полем, в которых датчиком является газоразрядный счетчик Гейгера (типа СТС-6), регистрирующий β -излучения продуктов распада ^{222}Rn . Радиометр РЕВАР позволяет организовать автономные долговременные наблюдения с длительностью интервала времени накопления (Δt) от 10 с до 99 ч с шагом одна секунда. Накапливаемые данные сохраняются в сменном модуле энергонезависимого запоминающего устройства и затем переносятся в ПК через последователь-

ный порт RS-232. Как показал опыт работ, регистраторы радиометров РЕВАР, изготовленные фирмой “КЛАССИК” на современной базе комплектующих, зарекомендовали себя как надежные, неприхотливые приборы, позволяющие вести регистрацию подпочвенного Rn с автономностью работы до двух месяцев. Следует отметить, что данный метод регистрации Rn был разработан и реализовывался одним из авторов статьи на многих полигонах бывшего СССР [10] еще с 1970-х годов XX в.

С целью проверки идентичности приборов была проведена одновременная регистрация вариаций Rn тремя приборами в точке 1 (ПРТ), измерительные камеры которых закапывались на глубину один метр, а длительность времени измерения составляла одну минуту. Результаты сравнительных измерений показали, что разброс осредненных значений числа импульсов в десятиминутных интервалах составлял от 200 до 280 имп/мин. Для дальнейших наблюдений для каждого прибора вводился относительный поправочный коэффициент. В течение ноября 1999 г. на станции ПРТ проводились сравнительные одновременные наблюдения с помощью радиометров РЕВАР и РГА-01. При качественном совпадении результатов наблюдений обоими приборами данные радиометров РЕВАР отличались существенно большей детальностью.

С целью выбора тензочувствительных точек для регистрации Rn в подпочвенном газе радиометр РЕВАР первоначально был установлен в пункте Кеткина (КТК), расположенном в 40 км от ПРТ в долине реки Авача, где измерения проводились в песчано-аллювиальных отложенных речной долины на глубине около двух метров по методике, описанной выше. Затем радиометр был перенесен в пункт Голубая Лагуна (ГЛЛ), расположенный в пяти километрах от ПРТ, где измерительная камера была установлена в 4-х метрах от обсаженной скважины глубиной 700 м и уровнем термальной воды на 60 м ($T = 64^\circ$) от поверхности. Последняя точка оказалась предпочтительной и была выбрана в качестве постоянно действующей станции (рис. 2).

В октябре 2000 г. на станции ГЛЛ был установлен модифицированный радиометр РЕВАР. Этот радиометр позволял поочередно регистрировать концентрацию Rn из двух измерительных камер. В это же время с целью расширения апертуры сети станций и сравнения отклика в динамике подпочвенного Rn на изменения напряженно-деформированного состояния среды геотермальных систем с районами разломных зон была организована станция Левая Авача (ЛВЧ), оснащенная таким же радиометром. Станция расположена на речной террасе в 100 м от русла реки. На обеих станциях установлены две измерительные камеры на

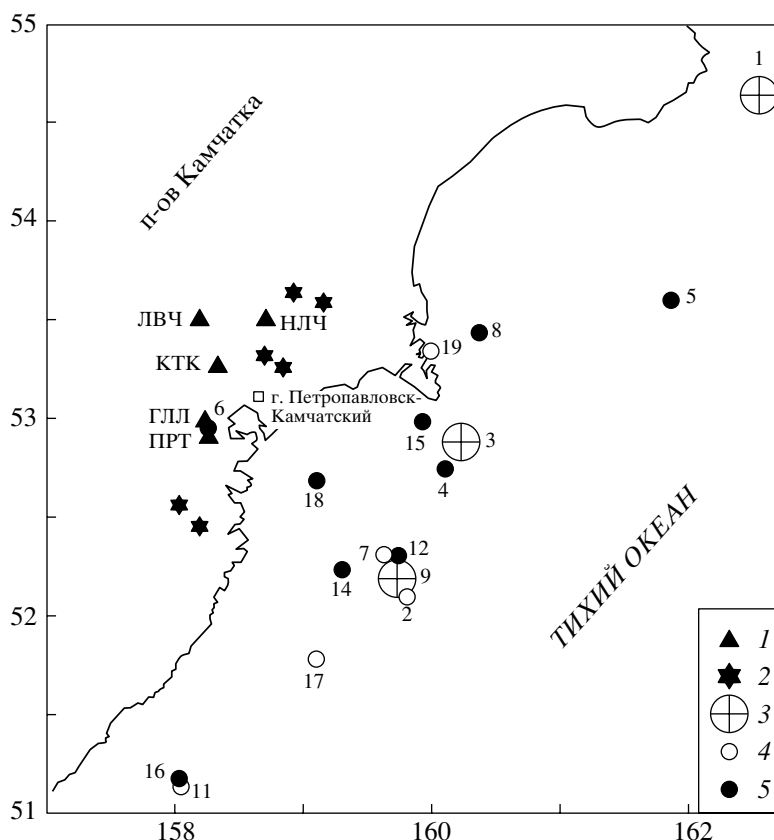


Рис. 2. Схема размещения станций мониторинга концентрации ^{222}Rn в почвенном газе на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне и эпицентры землетрясений за период с 01.11.1997 по 31.12.2000 г. со значениями параметра $\varepsilon = E/R^3 \geq 0.0007 \text{ Дж/м}^3$: 1 – станции; 2 – вулканы; 3–5 – землетрясения: 3 – $\varepsilon \geq 0.02$; 4 – $0.02 > \varepsilon > 0.002$; 5 – $0.002 > \varepsilon \geq 0.0007 \text{ Дж/м}^3$. Цифрами указаны землетрясения согласно табл. 2.

глубинах 0.9 и 1.9 м от дневной поверхности. Расположение станций показано на рис. 2а их координаты, сроки регистрации и виды приборов приведены в табл. 1.

Для метрологического обеспечения всего парка аппаратуры в конце 2000 г. был приобретен радиометр РРА-01М-03, позволяющий регистрировать ОА Rn в почвенном воздухе в диапазо-

Таблица 1. Координаты станций регистрации концентрации Rn в почвенном газе Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона в 1998–2000 гг.

Название	Сокращение	Координаты		Способы регистрации		Краткая характеристика места расположения станции
		$\varphi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	α -излучение РГА-01	β -излучение РЕВАР	
Паратунка (опорная ст.)	ПРТ	52.90	158.26	с 01.11.97 до 29.12.000	с 1.10.2000 г. до настоящего времени	Гидротермальная система, две разноглубинные точки
Голубая лагуна	ГЛЛ	52.99	158.23	–	25.02.2000 г. до настоящего времени	Гидротермальная система, две разноглубинные точки
Налычево	НЛЧ	53.50	158.70	с 1.01.98 г. по 15.07.98 г.	–	Гидротермальная система
Кеткино	КТК	53.26	158.33	–	с 4.11.99 г. по 16.01.00 г.	Песчано-аллювиальные отложения долины р. Авача
Левая Авача	ЛВЧ	53.50	158.19	–	с 13.10.2000 г. до настоящего времени	Разломная зона, две разноглубинные точки

Примечание. Прочерк означает, что измерения не проводилось.

не 20–20000 Бк/м³ с погрешностью 20%. Совместная регистрация радиометрами РРА-01М-03 и РЕВАР дала следующее соотношение между значениями ОА Rn в диапазоне 5–15 КБк/м³ и β-излучением (имп/мин) $K = \text{ОА Rn}/N = 9.1 \pm 0.4$ Бк мин/м³ имп. Это позволило срастить ряды наблюдений, выполненные разнотипной аппаратурой.

При сопоставлении вариаций ОА Rn с сейсмичностью Камчатского региона использовался оперативный каталог землетрясений Камчатской опытно-методической сейсмологической партии ГС РАН. В качестве параметра, характеризующего интенсивность землетрясения в точке регистрации, для наиболее сильных землетрясений с энергетическим классами $K \geq 12.0$ (где $K = \lg E$) бралась величина $\epsilon_{\text{ПРТ}} \approx E/R^3 > 0.0007$ Дж/м³, где E – энергия, выделившаяся в очаге; R – гипоцентрального расстояние. Магнитуда землетрясений бралась из каталога центра землетрясений США – National Earthquake Information Center (NEIC).

Для контроля атмосферных процессов использовался архив КОМСП ГС РАН оперативных гидрометеорологических данных, полученных с метеостанции Пионерская (температура, давление, количество осадков), расположенной в 40 км от пункта регистрации. Влияние вариаций атмосферного давления и температуры на динамику подпочвенного Rn учитывалось с помощью известной методики компенсации метеопараметров А.А. Любушина (мл) [6]. Статистическая обработка результатов измерений проводилась адаптированным для этих целей пакетом обработки сигналов (ПОС) НПП “МЕРА” [8].

Влияние метеофакторов на динамику подпочвенного Rn в различных пунктах регистрации и ее сезонные вариации. На рис. 3а–3в приведены результаты регистрации концентрации Rn на трех станциях (ПРТ, ГЛЛ, ЛВЧ) в двух разноглубинных точках, а на рис. 3г – данные о метеопараметрах за период с 1.10.2000 по 32.12.2000 гг. Осреднение проводилось в трехчасовых интервалах. Из сопоставления графика вариаций атмосферного давления (рис. 3г, толстая линия) и концентраций Rn видно, что зависимость концентрации Rn от вариаций атмосферного давления характерна для т. 1 станции ПРТ и обеих точек станции ГЛЛ. На этих станциях наблюдается резкое возрастание концентрации Rn при падении атмосферного давления, что указывает на хорошо выраженную конвективную составляющую в массопереносе радона.

Совершенно другая форма отклика концентрации Rn на уменьшение атмосферного давления на станции ЛВЧ (рис. 3в). Отклик начинается с резкого уменьшения концентрации Rn с последующим экспоненциальным возвратом до прежнего уровня (“клевок”). Такая форма отклика, по-видимому, свидетельствует о том, что конвективная составляющая массопереноса Rn к дневной

поверхности для этой станции очень мала, и после резкого “высасывания” подпочвенного воздуха идет экспоненциальное восстановление концентрации Rn до прежнего уровня за счет диффузионной составляющей. На незначительную величину конвективной составляющей на станции ЛВЧ также указывают:

- минимальная разница значений концентрации Rn в разноглубоких точках (0.9 и 1.9 м);

- длительное время (~100 ч) восстановления диффузионного равновесия по сравнению со станцией ПРТ (18 ч).

Влияние температуры воздуха на изменения концентрации Rn для всех трех станций проявляется различно. Для т. 1 ПРТ отмечается сильная зависимость концентрации Rn от температуры воздуха. На рис. 3а видно, что после понижения температуры воздуха ниже нуля, началось падение концентрации Rn, достигшее в декабре минимальных значений. Для станции ГЛЛ эта зависимость выражена слабее, в то время как на станции ЛВЧ связь концентрации Rn с падением температуры воздуха не отмечается.

Эти качественные различия в поведении концентрации Rn в зависимости от метеоусловий на станциях, расположенных в зонах гидротермальных систем (ПРТ, ГЛЛ) и в разломной зоне (ЛВЧ), дают основание предполагать, что на первых двух станциях реализуется случай переноса подпочвенного радона в рыхлых отложениях с сосредоточенными параметрами (рис. 1в). Станция ЛВЧ расположена в пункте, для которого перенос подпочвенного радона, по-видимому, осуществляется в рыхлых отложениях с распределенными параметрами (рис. 1б).

С целью выделения периодических составляющих в вариациях атмосферного давления и концентрации Rn в т. 1 станции ПРТ (рис. 4б) при интервале регистрации 15.5 месяцев также выделяются пики на этих частотах, а в спектрах концентрации Rn в т. 2 ПРТ и других пунктах спектральные пики на частотах 1, 2, 3 цикла/сут не отмечаются.

Для всех трех станций вычислялись квадрат модуля спектра когерентности (γ^2) и амплитудно-частотная передаточная функция (H) между концентрацией Rn и атмосферным давлением (рис. 4а, 4б). Для т. 1 станции ПРТ для обоих параметров четко выделяются максимумы на частотах 1 и 2 цикл/сут. Значения γ^2 составляют около 0.6 в диапазоне частот 0.1–2 цикл/сут, а максимум передаточной функции $H = 400$ Бк ГПа/м³ приходится на диапазон частот 0.7–1.2 цикл/сут. Для т. 2 станции ПРТ влияние атмосферного давления на концентрацию Rn незначительно ($2 < 0.2$; $H < 20$ Бк ГПа/м³). Для станции ГЛЛ в т. 1 характер поведения γ^2 и H качественно близок к характеру поведения этих параметров для т. 1 ст. ПРТ. Для т. 1 станции ЛВЧ амплитудно-частотная передаточная функция

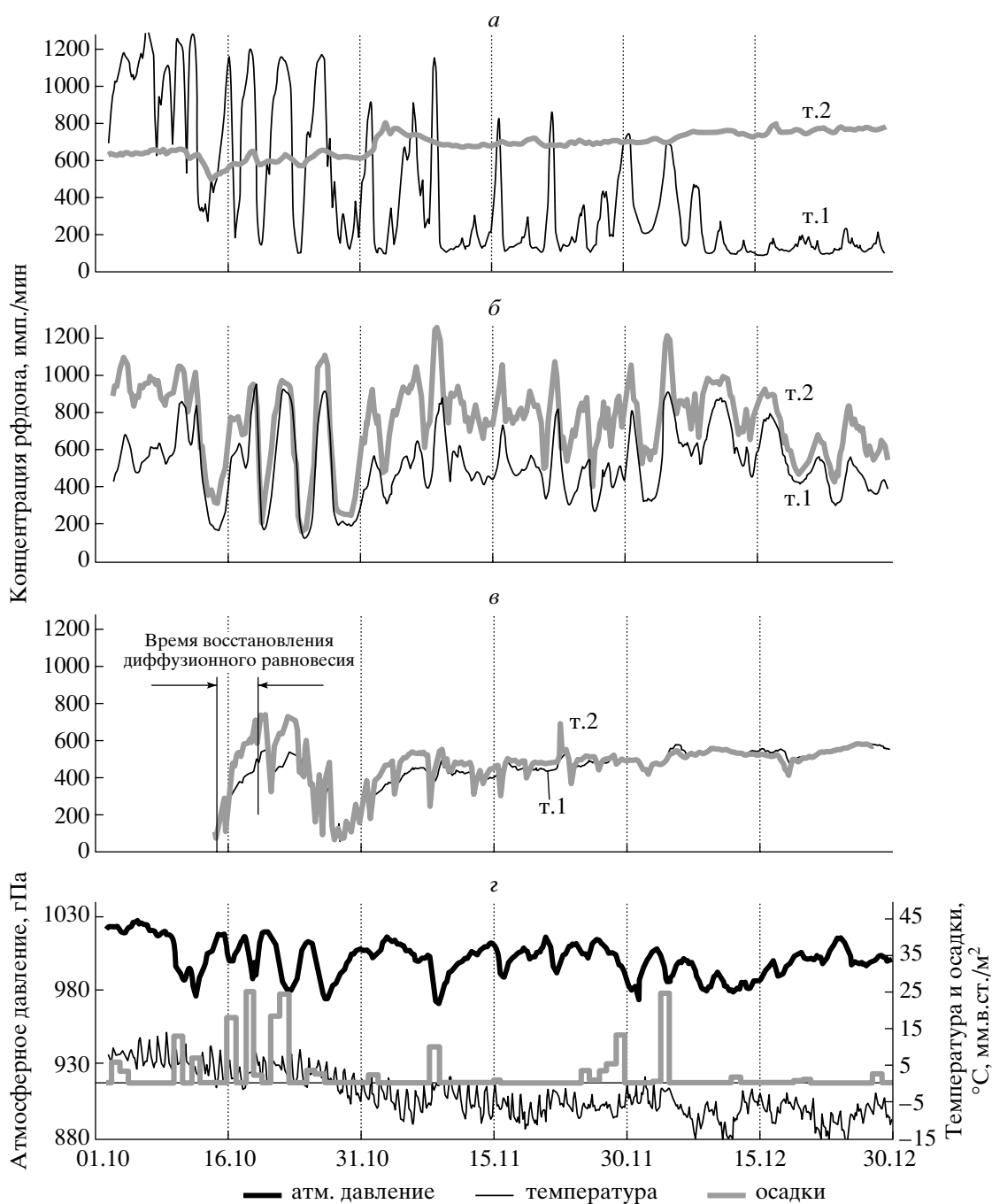


Рис. 3. Результаты регистрации концентрации Rn в почвенном газе в двух разноглубоких точках, осредненные в трехчасовых интервалах за период 01.10–31.12.2000 г., на трех станциях: а – Паратунка, б – Голубая Лагуна, в – Левая Авача, и метеопараметры (г).

очень мала ($H < 30$ Бк ГПа/м³), что подтверждает сделанное ранее предположение о слабом влиянии конвективной составляющей в этой точке, хотя следует заметить, что для этой станции ряд наблюдений сравнительно мал. Из сопоставления рис. 3–5 видно, что наибольшему влиянию флуктуаций атмосферного давления подвержена точка 1 станции ПРТ, а также точки станции ГЛЛ,

хотя значения передаточной функции для последней станции в два раза меньше, чем для ПРТ.

С целью изучения характера сезонного хода концентрации Rn для станции ПРТ данные за период 1998–1999 гг. (частота измерений два раза в сутки) сглаживались методом скользящего среднего по 15 точкам (7.5 дня). После смены системы наблюдений с ноября 1999 г. данные предвари-

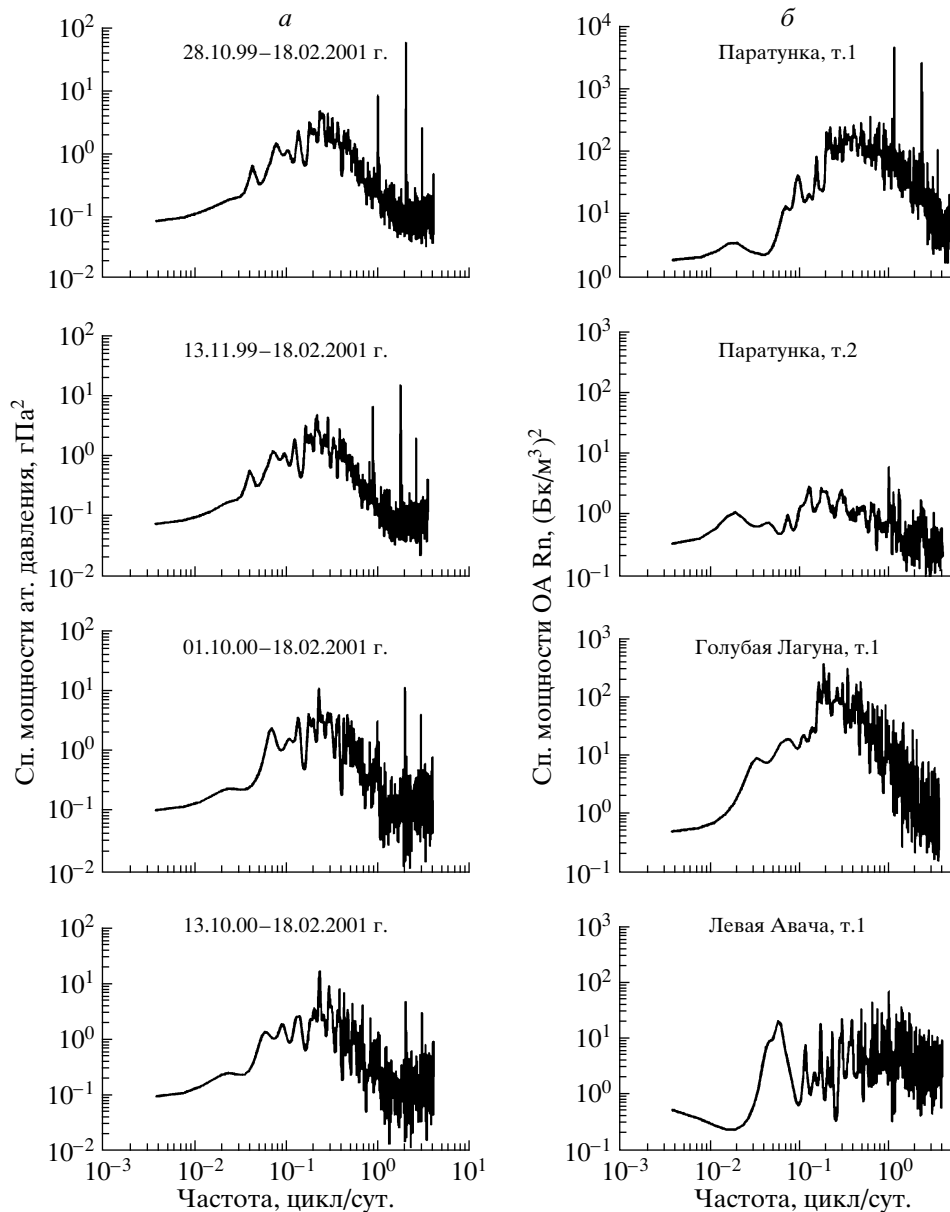


Рис. 4. Спектры мощности Бурга “продифференцированных” рядов значений концентрации Rn для станций ПРТ (2 точки), ГЛЛ, АВЧ (б) и атмосферного давления за соответствующий период времени (а).

тельно усреднялись по полусуточным интервалам, а затем также сглаживались методом скользящего среднего по 15 точкам. Аналогичной обработке подвергались данные станции НЛЧ (январь–июль 1999 г.) и станции ГЛЛ (март–июль 2000 г.). На рис. 6а–6в видно, что в течение года наблюдается хорошо выраженная сезонная периодичность в изменении ОА Rn, которая согласуется с сезонным ходом температуры воздуха (рис. 6г). Кривые сезонного изменения температуры воздуха за период 1998–2000 гг. построены по той же методике, что и кривые концентрации Rn. Коэффициент корреляции между ОА Rn и температурой составляет для т. 1 $r_1 = 0.72$ и для т. 2 $r_2 = -0.72$,

при $r = 0.2$ для 95% уровня доверия. Причем максимум коэффициента корреляции наблюдается при сдвиге кривой ОА Rn относительно кривой температуры на 10 сут для т. 1 и на 72 сут для т. 2. Это указывает и на то, что сезонные вариации ОА Rn подпочвенного воздуха, по-видимому, обусловлены сезонным изменением температуры геолитотермозоны рыхлых отложений.

Характер поведения сезонного хода ОА Rn в подпочвенном воздухе для обеих точек различен. Если отношение Rn_{\max}/Rn_{\min} для т. 1 составляет 5–7, то для т. 2 не более 3. Такое различие в поведении кривых ОА Rn указывает на то, что т. 2 расположена вблизи зоны насыщения, поэтому влияние

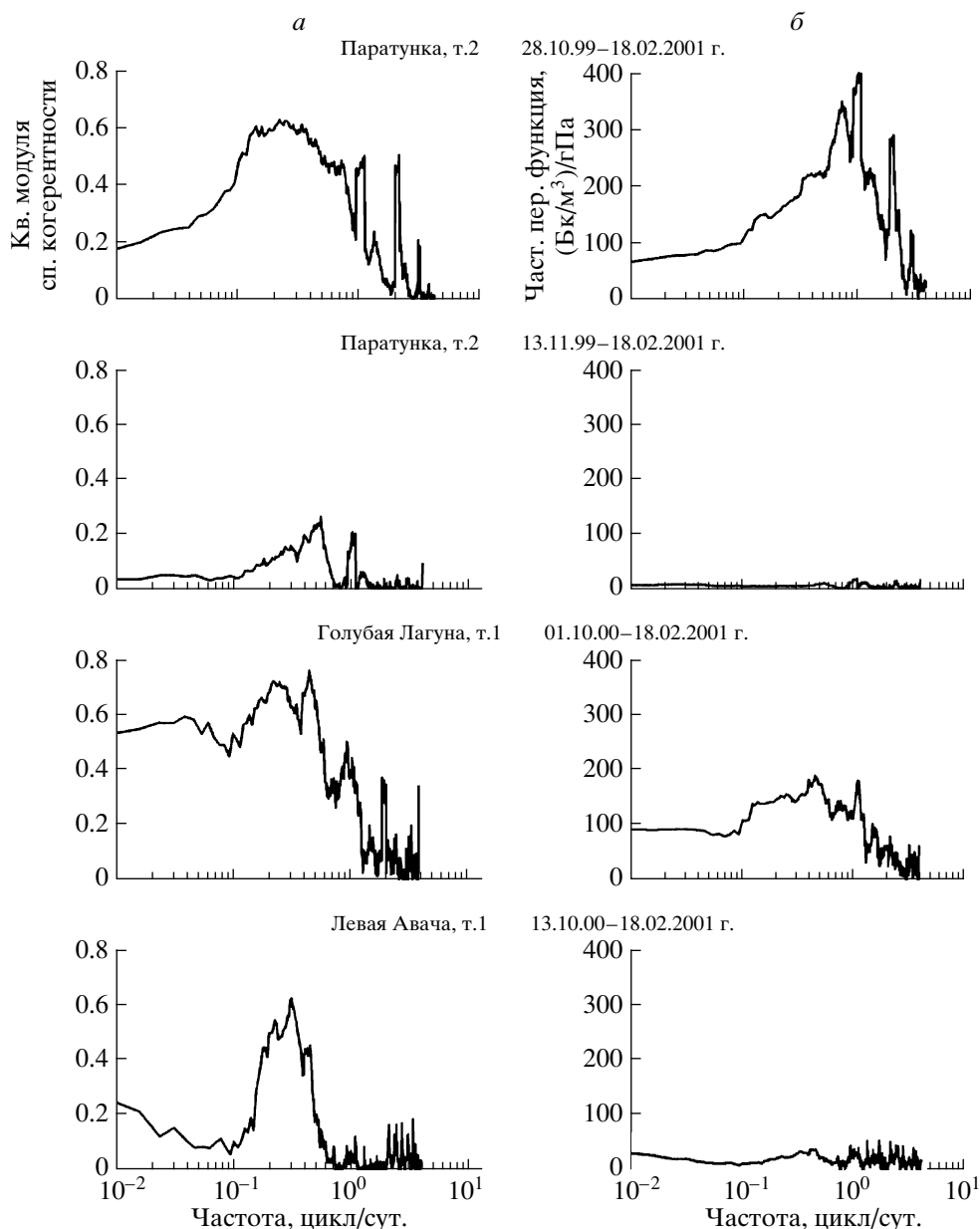


Рис. 5. Квадрат модуля спектра когерентности (а) и амплитудно-частотная передаточная функция между ОА R_n и атмосферным давлением (б) для станций ПРТ (2 точки), ГЛЛ, АВЧ.

температурного сезонного хода, так же как и влияние вариаций атмосферного давления в этой точке на динамику почвенного R_n , менее выражена, чем в т. 1.

Качественно в сезонном ходе концентрации почвенного R_n можно выделить три участка: I – осенне-зимний (октябрь–середина апреля); II – весенний (конец апреля – май); III – летний (июнь–сентябрь). В осенне-зимний период понижение температуры воздуха ниже нуля ведет к промерзанию грунта и к уменьшению проницаемости верхнего слоя пород. Это приводит к увеличению

концентрации R_n в зоне насыщения (т. 2) и ее уменьшению в зоне аэрации (т. 1).

После того как температура воздуха принимает плюсовое значение (участок II, рис. 6), за счет инфильтрации талых вод начинает повышаться уровень подземных вод. Талые воды проникают в водоносный горизонт сквозь сезонно-мерзлый слой по морозобойным трещинам, порам и корням растений, повышая температуру в зоне аэрации на $0.5\text{--}2^\circ\text{C}$ [5]. За счет этого в зоне насыщения наблюдается уменьшение концентрации R_n на 20–25% и резкое увеличение концентрации R_n до 200% и более в зоне аэрации. Такая же картина

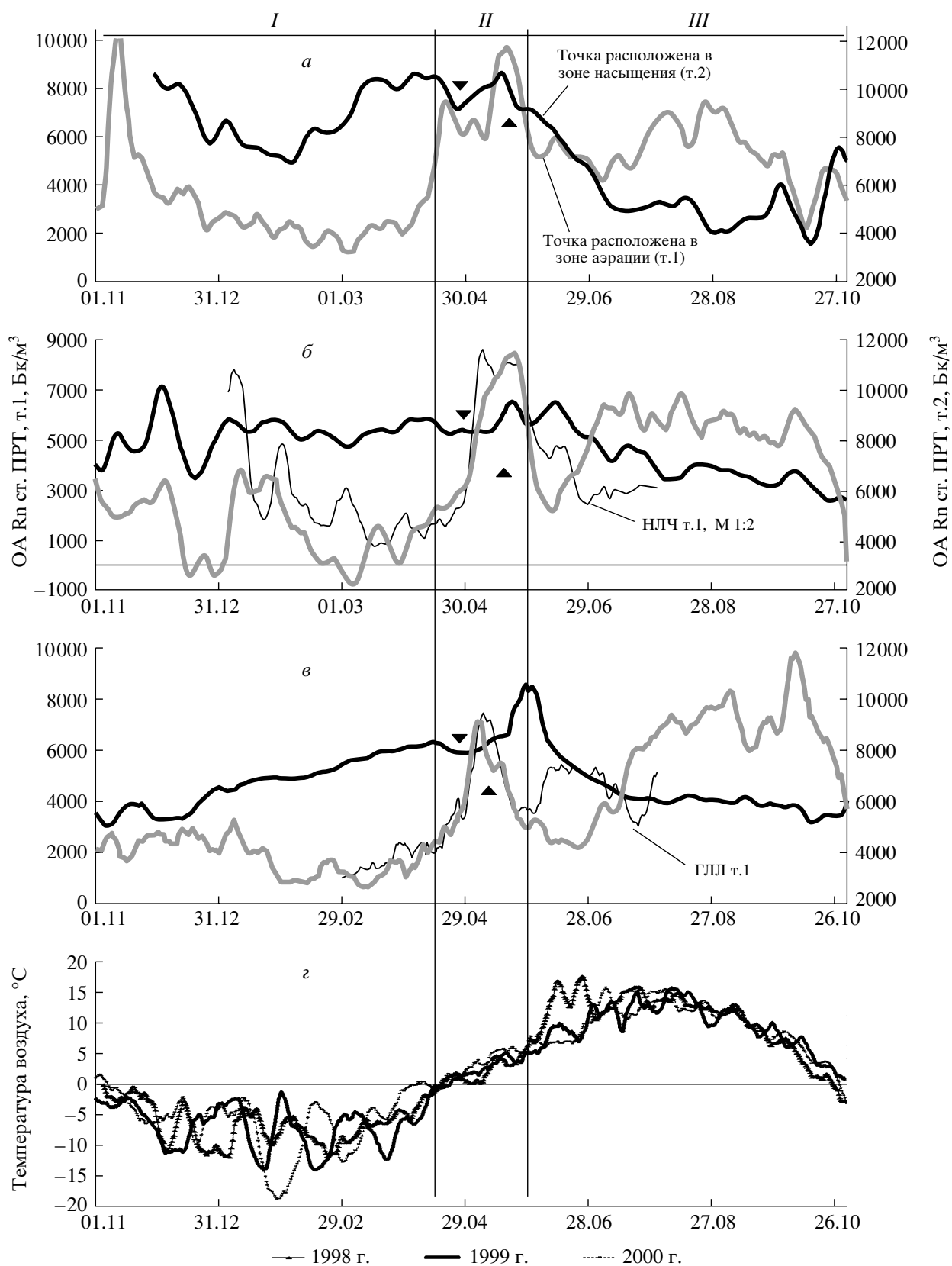


Рис. 6. Сезонный ход концентрации подпочвенного Rn в районах гидротермальных систем Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (а – 1998; б – 1999; в – 2000 г.) и сезонный ход температуры воздуха по данным станции “Пионерская” за период с 01.11.1997 по 01.11.2000 г. (г).

Таблица 2. Каталог землетрясений за ноябрь 1997 – декабрь 2000 г.

Дата число, мес., год	Время ч, мин, с	Широта, град.	Долгота, град	Глубина, км	Гипоцетральное расстояние, км	Класс	M_{NEIC}	E_k/R^3
05.12.1997	11 : 26 : 43	54.65	162.55	10	342	15.5	7.9	0.079
27.05.1998	20 : 41 : 36	52.1	159.8	11	119	13.4	5.7	0.0098
01.06.1998	05 : 34 : 04	52.88	160.22	35	136	13.7	6.9	0.0199
09.08.1998	11 : 32 : 56	52.75	160.1	41	131	12.3	4.6	0.0009
30.08.1998	14 : 34 : 51	53.6	161.87	11	252	13.4	5.6	0.0016
31.10.1998	14 : 03 : 33	52.95	158.26	162	162	12.5	5.5	0.0007
11.01.1999	10 : 48 : 52	52.31	159.62	10	113	12.9	5.6	0.0055
06.02.1999	13 : 36 : 14	53.43	160.37	36	156	12.6	5.2	0.001
08.03.1999	12 : 25 : 46	52.19	159.74	3	127	14.2	7.0	0.0764
07.07.1999	18 : 53 : 00	49.09	156	10	452	13.8	5.8	0.0007
18.09.1999	21 : 28 : 35	51.14	158.05	5	196	13.4	6	0.0033
21.10.1999	12 : 24 : 50	52.3	159.73	11	120	12.4	5.3	0.0014
11.11.1999	02 : 41 : 48	49.62	157.4	1	369	13.7	5.7	0.001
30.12.1999	00 : 11 : 49	52.22	159.3	23	106	12.2	5.1	0.0013
31.12.1999	18 : 47 : 20	52.98	159.93	30	116	12.4	4.1	0.0016
12.05.2000	17 : 21 : 27	51.18	158.04	49	191	12.8	5.2	0.0008
03.08.2000	03 : 54 : 45	51.78	159.1	48	137	12.9	5.7	0.0024
27.08.2000	01 : 45 : 29	52.68	159.1	87	106	12.2	4.9	0.0013
20.12.2000	09 : 20 : 00	159.99	159.99	68	142	13.1	5.6	0.0043

в этот период наблюдается на станциях НЛЧ и ГЛЛ (рис. 6б, 6в), расположенных в зонах гидротермальных систем. Падение уровня грунтовых вод приводит к понижению уровня открытой поверхности зоны насыщения (эффект “засасывания”). Это приводит к перемещению столба атмосферы в рыхлых отложениях внутрь зоны аэрации и, соответственно, к резкому уменьшению концентрации Rn в зоне аэрации и увеличению его в зоне насыщения. Наиболее отчетливо этот эффект проявился в 2000 г. (рис. 6г).

Летний период (участок III) характеризуется прогревом верхнего слоя почвы и увеличением его проницаемости, вызывающей уменьшение градиента концентрации Rn с глубиной.

Связь динамики ОА Rn в подпочвенном газе с сильными землетрясениями Авачинского залива. В табл. 2 приведены основные параметры землетрясений с $\varepsilon_{прг} = E/R^3 > 0.0007$ Дж/м³, происшедших за период 01.11.1997 г. – 31.12.2000 г., а на рис. 2 приведена карта эпицентров этих землетрясений. Наиболее сильными за этот период были события: № 1–05.12.1997 г. ($M_{wOBN} = 7.9$); № 3 – 1 июня 1998 г. ($M_{wOBN} = 6.9$); № 9 – 08.03.1999 г. ($M_{wOBN} = 7.0$). Последние два землетрясения произошли в Авачинском заливе (рис. 2) и ощущались в г. Петропавловск-Камчатском силой 4–5 баллов.

В рамках рассматриваемой методики в реальном времени в период с июля 1998 г. по август 1999 г. сделано 4 оправдавшихся прогноза землетрясений с $K > 12.5$ и временем упреждения 1–30 сут [15], прогноз которых по месту времени и энергии в целом оправдался, но для землетрясения 08.03.1999 г. с $K = 14.2$ был пропуск цели. Из общепринятых представлений следует, что длительность деформационных предвестников землетрясений с такой энергией должна быть с несколько месяцев [13]. Поиск предвестниковых аномалий в динамике подпочвенного Rn с продолжительностью, соизмеримой с годовым интервалом, представляет определенную сложность, так как такие аномалии затушевываются сезонным ходом. Как видно на рис. 6 и рис. 7а, на котором показана динамика ОА Rn для обеих точек станции ПРТ, сезонный ход в целом устойчив. Но для получения “среднестатистического портрета” сезонных вариаций трех годовых циклов недостаточно, тем более что в первых двух годовых циклах в Авачинском заливе произошли сильные сейсмические события. С целью поиска длиннопериодных вариаций в поведении динамики ОА Rn сезонный ход 2000 г. был принят за “невозмущенный” и рассматривалась разница между значениями ОА Rn в 2000 г. и предшествующими годами в соответствующие времена сезона (рис. 7а).

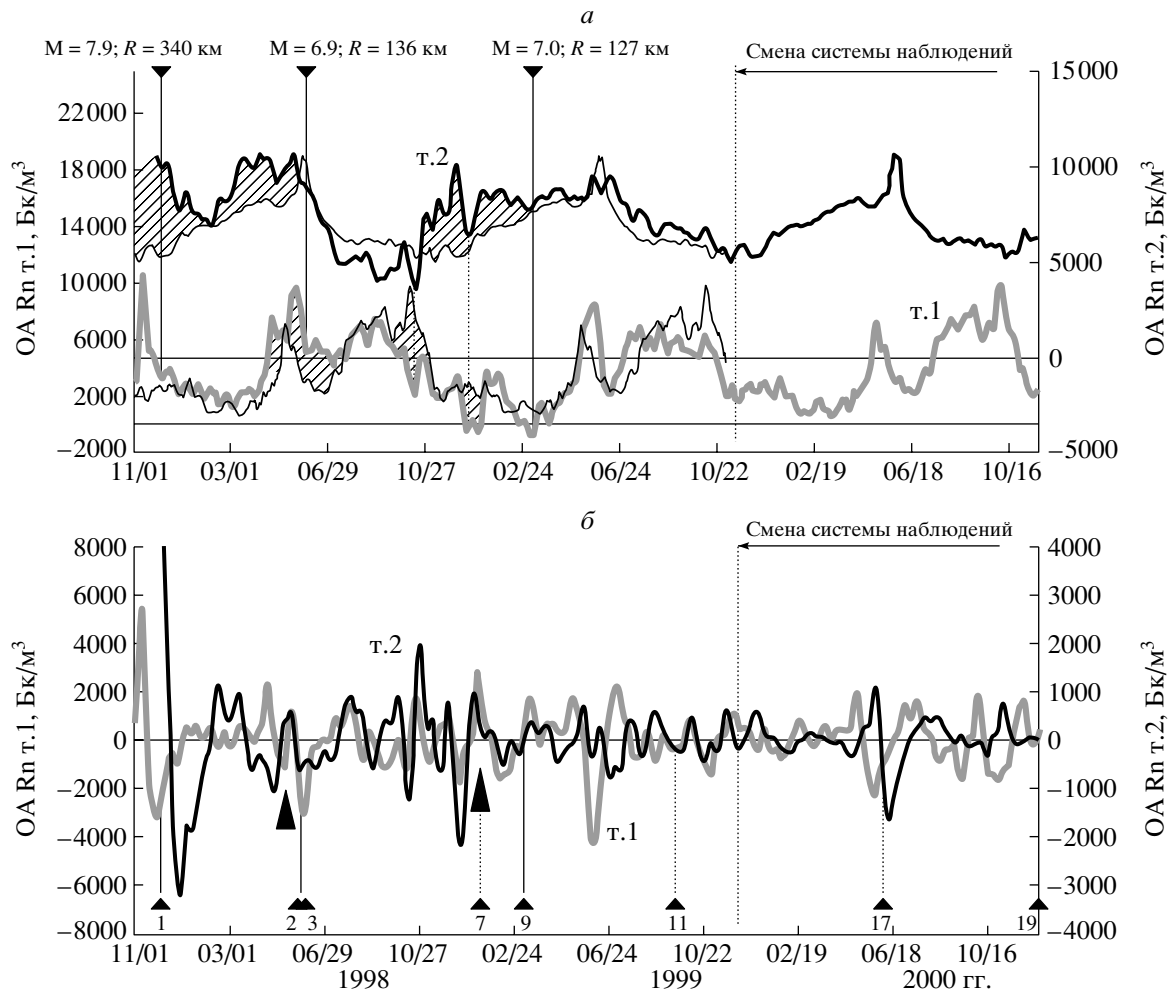


Рис. 7. Изменение $OA Rn$ на станции ПРТ за период 01.11.1997 г. – 31.12.2000 г. в двух разноглубоких точках (1 и 3 м) и его отклонения относительно “невозмущенного” сезонного хода 2000 г., треугольниками отмечены землетрясения с $\epsilon \geq 0.02$ Дж/м³ (а); кривые $OA Rn$, отфильтрованные полосовым фильтром с $0.02 < f_{гр} < 0.04$ цикл/сут, треугольниками отмечены землетрясения с $0.02 > \epsilon > 0.002$ Дж/м³, стрелками показаны синфазные колебания на обоих каналах (б).

На рис. 7а видно, что для т. 2 кривые значений $OA Rn$ превышают “невозмущенный” уровень более чем на 25% на трех временных участках: после землетрясения 1 и перед землетрясениями 3 и 9 (заштрихованные области). Превышение над “невозмущенным” уровнем перед землетрясением № 3 началось за 85 дней (0.23 г), а перед землетрясением 9 за 160 дней (0.44 г). Отсутствие ярко выраженных отклонений в т. 1 от “невозмущенного” сезонного хода $OA Rn$, по-видимому, объясняется тем, что в осенне-зимний период из-за промерзания верхнего слоя грунта резко падает тензочувствительность в т. 1.

Как было показано ранее [15], в спектрах $OA Rn$ для обеих точек выделяется главный максимум с частотой около 0.03 цикл/сут. С целью выделения синхронного поведения обоих каналов вблизи этих частот ряды $OA Rn$ за трехлетний период были профильтрованы полосовым филь-

ром $0.02 < f_{гр} < 0.04$ цикл/сут. Отфильтрованные кривые приведены на рис. 7б на котором видно, что синфазное поведение отфильтрованных кривых $OA Rn$ хорошо прослеживается перед землетрясениями № 3 и № 9 (стрелки на рис. 7б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выбор “невозмущенного” сезонного хода в год слабой сейсмичности изучаемого региона является вынужденной процедурой на данный период исследований, поэтому следует рассмотреть более подробно вопрос правомерности рассмотрения отклонения уровня $OA Rn$ относительно “невозмущенного” сезонного хода перед сильными землетрясениями Авачинского залива как предвестниковые аномалии. Для этого рассмотрим более детально динамику подпочвенного радона перед землетрясениями 3 и 9.

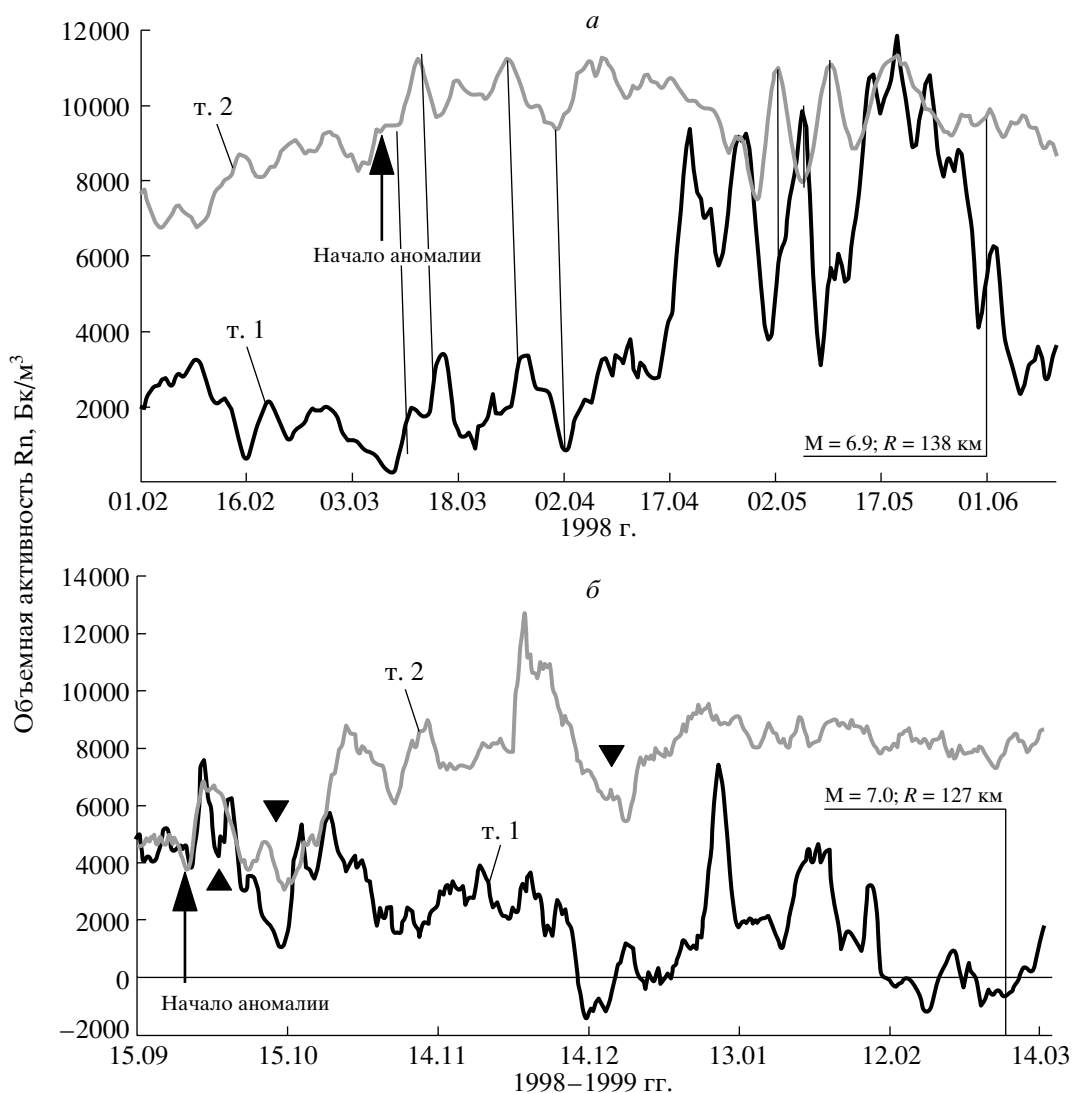


Рис. 8. Изменения ОА Rn в пункте ПРТ за период 01.02–01.06.1998 г., линиями отмечено синфазное поведение кривых в начале формирования предвестниковой аномалии (а); изменения ОА Rn за период 15.09.1998–15.03.1999 г., треугольниками отмечены синфазные вариации на обоих каналах в начале формирования предвестниковой аномалии (б).

Скомпенсированные на баровариации кривые ОА Rn для обеих точек в пункте ПРТ, сглаженные методом скользящего среднего по 5 точкам (2.5 дня), за период 01.02.–01.06.1998 г. показаны на рис. 8а и за период 15.09.1998–15.03.1999 г. на рис. 8б.

На рис. 8а за 85 сут перед событием 01.06.1998 г. с $M = 6.9$ стрелкой отмечено начало превышения значений ОА Rn в т.2 (08.03.1998 г.) относительно “невозмущенного” сезонного хода. Начиная с этого времени, на обоих каналах в течение месяца наблюдались синхронные колебания значений ОА Rn со сдвигом около двух суток. Нарушение синхронности поведения кривых с середины апреля, вероятнее всего, связано с весенними возмущениями сезонного хода. За месяц перед землетрясением в динамике ОА Rn на обоих каналах

возникают колебания с периодом 7–10 дней, по-видимому, также связанные с подготовкой землетрясения 3. На это косвенно указывает отсутствие колебаний с такими периодами гидрологического режима реки Паратунка и температуры воздуха.

Обращает на себя внимание появление синхронных вариаций в динамике ОА Rn с периодом около 30 сут в разноглубоких точках за четыре месяца перед землетрясением 9 (отмечены треугольниками на рис. 8б). Появление синфазных вариаций на начальной стадии формирования предвестниковых аномалий в динамике подпочвенного радона в разноглубоких точках возможно только в случае изменения напряженно-деформированного состояния блока горных пород в точке регистрации, так как все остальные причи-

ны (температура, осадки, уровень грунтовых вод) приводят к асинхронному поведению ОА Rn подпочвенного воздуха в разноглубоких точках.

Считается общепризнанным, что динамика подпочвенного радона отражает изменения напряженно-деформированного состояния горных пород. По оценкам, выполненным в работе [1], нижний предел деформаций, на который реагирует подпочвенный Rn, оценивается в 5×10^{-7} , а деформационный радиус в зависимости от геометрической формы включения для землетрясений с $M = 7$ оценивается в 150–550 км. В [13] приводится эмпирическая зависимость, связывающая длительность предвестника (T , сут) и эпицентральное расстояние (R , км) с магнитудой для деформационных предвестников: $LgTR = 0.67M - 0.38$. Данные, полученные нами для обоих случаев, хорошо укладываются в эти оценки, что служит косвенным подтверждением наличия отклика в динамике подпочвенного Rn на развитие деформационных процессов, связанных с подготовкой сильных землетрясений в Авачинском заливе.

Приведенные данные позволяют считать, что подготовка землетрясений Авачинского залива с $M > 6.5$ находит отражение в динамике подпочвенного Rn в разноглубоких точках опорного пункта ПРТ и по данным мониторинга подпочвенного радона с большой степенью вероятности могут быть своевременно обнаружены предвестники готовящегося землетрясения.

Выводы. 1. Дано описание феноменологической модели динамики поля подпочвенного радона тектонических нарушений, и с позиции этой модели рассмотрены результаты регистрации ОА Rn в подпочвенном воздухе на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне за 1998–2000 гг.

Для районов гидротермальных систем распределение концентрации Rn с глубиной можно рассматривать как случай с сосредоточенными 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.

2. Полученные три годовых цикла регистрации ОА Rn на Паратунской гидротермальной системе (ПРТ) в двух разноглубоких точках (1 и 3 м) позволили установить, что основной причиной, влияющей на динамику сезонного хода ОА Rn, является сезонный ход температуры верхнего слоя рыхлых отложений.

3. На основе сравнения сезонного хода динамики ОА Rn “невозмущенного” в 2000 г. с предшествующими двумя годами получены значительные превышения в сезонном ходе длительностью 0.23 и 0.44 г. перед двумя сильными землетрясениями, происшедшими в Авачинском заливе 01.06.1998 г.

($M_w = 6.9$, $R = 136$ км) и 08.03.1999 г. ($M_w = 7.0$, $R = 127$ км). Эти возмущения можно рассматривать как предвестниковые аномалии.

Авторы благодарят Б.В. Иванова за проявленный интерес к работе и поддержку на всех этапах ее выполнения, В.А. Широкова за обсуждение вопросов, затронутых в статье и полезные советы, Г.Н. Копылову за конструктивную критику. Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РФФИ № 99-05-65644, Президиума ДВО РАН, Областной Администрации. Особенную благодарность авторы приносят генеральному директору фирмы “ИНФОРСЕР” И.Л. Колоколову, оказавшему спонсорскую поддержку при приобретении первой партии радиометров “РЕВАР”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атаев С., Изюмов С.Ф., Кузьмин Ю.О. Деформационная природа возникновения аномалий радона в подземных водах Ашхабадского сейсмоактивного района // Изв. АНТ. ФМТХГ. 1992. № 3. С. 83–89.
2. Авдуалиев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П. Радоновый предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии // Докл. АН СССР. 1986. Т. 291. № 4. С. 924–927.
3. Барсуков В.Л., Варшал Г.М., Гаранин А.В., Замокина Н.С. Значение гидрогеохимических методов для краткосрочного прогноза землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 3–16.
4. Граммаков А.Г. Эманационный метод поисков, исследования и разведки радиоактивных объектов // Тр. ЦНИГРИ. 1934. Вып. 7. 135 с.
5. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Наука, 1973. 151 с.
6. Любушин А.А. (мл). Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103–108.
7. Новиков Г.Ф., Копков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. М.: Наука, 1965. 564 с.
8. ПОС: Пакет обработки сигналов. Руководство пользователя. М.: НПП “Мера”, 1995. 257 с.
9. Пузанков Ю.М., Бобров В.А., Дучков А.Д. Радиоактивные элементы и тепловой поток земной коры полуострова Камчатка. Новосибирск: Наука, 1977. 125 с.
10. Рудаков В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ: Автореф. дис. ... доктора физ.-матем. наук. М.: ОИФЗ, 1992. 56 с.
11. Рудаков В.П. Мониторинг напряженно-деформированного состояния пород сейсмоактивного региона эманационным методом // Геохимия. 1986. № 9. С. 1337–1342.
12. Серезников А.И., Зимин В.М. Геологическое строение Паратунского геотермального района, влияние отдельных геологических факторов на современную гидротермальную деятельность // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток. 1976. С. 115–142.

13. Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 190 с.
14. Федотов С.А., Чернышев С.Д., Матвиенко Ю.Д., Жаринов Н.А. Прогноз Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. $M = 7.8 \dots 7.9$, Камчатка, и его сильных афтершоков с $M \geq 6$ // Вулканоология и сейсмология. 1998. № 6. С. 3–16.
15. 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 // Вулканоология и сейсмология. 1999. № 6. С. 1–11.
16. Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Докл. АН СССР. 1967. Т. 176. № 2. С. 319–329.
17. Al-Hilal M., Mouty M. Radon monitoring for earthquake prediction on Al-Grab fault of Syria // Nucl. Geophys. 1994. V. 8. № 3. P. 291–299.
18. Djefal S., Allab M., Cherouayi D.E. Further investigation on radon emanation along seismic faults in northern Algeria // Nucl. Geophys. 1994. V. 8. № 6. P. 583–591.
19. Dubinchuk V.T. Radon as a precursor of earthquakes // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P. 6–22.
20. King C.-Y. Gas-geochemical approaches to earthquake prediction // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P. 22–36.
21. Mogro-Compero A., Fleischer R.L., Lakes R.S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes // J.G.R. 1980. V. 85. P. 3053–3057.
22. Schroeder G.L., Kraner H.W., Wvans R.D. Diffusion of radon in several naturally occurring soil types // J.G.R. 1965. V. 70. P. 471–474.
23. Virk H.S., Baljinder Singh. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena // Tectonophysics. 1993. V. 227. P. 215–224.
24. Virk H.S., Sharma A.K., Walia V. Correlation of alpha-logger radon data with microseismicity in N-W Himalaya // Currents science. 1997. V. 72. № 9. P. 656–663.
25. Wakita H. Thermal and Hydrological signatures related to seismic events in Japan // Short term thermal and hydrological signatures related to tectonic activities. Workshop Walferdange 15–17 Nov. 1995. P. 49–64.
26. 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.
27. Zhang W. Research on Hydrogeochemical precursors to earthquakes in China // Prediction Studios on Earthquake and Volcanic Eruption by Geochemical and Hydrological Methods. Tokyo. 1996. P. 1–15.

Results from Observations of Subsurface Radon in 1997–2000 at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Site

P. P. Firstov¹, V. P. Rudakov²

¹*Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

²*Institute of Seismology, United Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 117296, Russia*

This paper provides a phenomenological model describing the time-dependent behavior of subsurface radon in tectonic faults. The model is used to discuss recordings of volumetric radon activity (VA Rn) in subsurface air at the Petropavlovsk-Kamchatskii geodynamic Site during three annual cycles, 1998–2000. The recordings of VA Rn during that time was made in the Korkin Brook valley (Paratunka Hydrothermal System) at two sites of different depths (1 and 3 m), as well as during 6 months or less at 4 more points within the Site having different geological and tectonic environments. An analysis of seasonal variations in the behavior of VA Rn prior to large earthquakes occurring in the Avacha Bay June 1, 1998 ($M_{\text{WOBN}} = 6.9$, $R = 136$ km) and March 8, 1999 ($M_{\text{WOBN}} = 7.0$, $R = 127$ km) revealed increased in VA Rn of up to 30% lasting 0.23 and 0.44 years. These increases seem to be precursory anomalies, which is also corroborated by several other facts.