УДК 519.682, 550.34.01, 550.343 Научная статья

Компьютерная программа для моделирования аномальных вариаций объемной активности радона на основе механизма его инжекции в поток грунтовых вод

Г. А. Каткова[1], Е. О. Макаров[1,2], Р. И. Паровик[1,3]

[1] Камчатский государственный университете имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4, Россия

[2] Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Пийпа б-р, 9, Россия

[3] Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, п. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

E-mail: ice@emsd.ru

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне работает сеть пунктов мониторинга подпочвенных газов. За время работы сети в поле подпочвенных газов были зарегистрированы аномалии, предваряющие сильные землетрясения с магнитудой M>5. По морфологическим признакам они разделены на два типа А и Б. В работе описывается разработанное программное обеспечение для моделирования возникновения радоновых аномалий на основании математической модели инжекции под воздействием импульсов напряжения изотопов в поток подземных вод с полным поперечным перемешиванием.

Ключевые слова: радон, аномалия радона, предвестниковая аномалия, математического моделирование, программа, землетрясение, прогноз

DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-165-178

Поступила в редакцию: 20.10.2022 В окончательном варианте: 18.11.2022

Для цитирования. Каткова Г. А., Макаров Е. О., Паровик Р. И. Компьютерная программа для моделирования аномальных вариаций объемной активности радона на основе механизма его инжекции в поток грунтовых вод // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 40. № 3. С. 165-178. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-165-178

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Каткова Г. А., Макаров Е. О., Паровик Р. И., 2022

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МД-758.2022.1.1 и частичной поддержке гранта РФФИ №20-05-00493.

Введение

Моделирование является одним из наиболее распространенных в науке видов деятельности. В геофизике, в том числе геодинамике, изучаемый объект часто недоступен прямому измерению. Исследователям доступны лишь его косвенные проявления, например, деформации земной коры при подготовке очага землетрясения. Моделирование по сути своей оказывается в подобных случаях единственным способом познания и прогноза явлений и событий [1].

В моделировании реальный объект с его многочисленными свойствами и связями с другими объектами, далеко не всегда известными и понятными, заменяется упрощённой системой допущений и предположений для описания выделенных и значимых для конкретного вопроса свойств объекта [1].

В науках о Земле используются два подхода к моделированию: физическое моделирование и математическое моделирование. Физическое моделирование позволяет выполнять эксперименты над физической моделью с математической обработкой результатов. Математическая модель объекта (состояния, явления, процесса) – приближённое и формализованное описание с помощью математических понятий и объектов, которое включает в себя геометрические образы, уравнения, логические соответствия, алгоритмические правила и др. Математическое моделирование – это вывод следствий из принимаемых математических моделей. Эти следствия носят характер заключений о виде зависимостей между различными параметрами модели, процессах, предсказываемых моделью, прогнозе возможных событий и т.д. Итогом математического моделирования могут быть модели строения геологических объектов, сведения о развитии геохимических процессов, например, массоперенос веществ в породе и многое другое [1]. Особое внимание в последнее время в мире уделено математическому анализу и компьютерному моделированию.

Большой интерес для исследователей представляет изучение процессов миграции радона в земной коре, в том числе с целью прогноза сильных землетрясений, подготовка очагов которых находит отражение в различных геофизических полях. Одной из задач современной геодинамики, связанной с сейсмической активностью и генерированием аномалий объемной активности радона (ОАР), является выяснение физических механизмов распространения и перераспределения энергии деформационных процессов в геологической среде.

С начала 1940-х годов с целью отработки методики поиска месторождений урановых руд начал интенсивно изучаться процесс миграции Rn в верхней толще горных пород в зависимости от литологического состава приповерхностных отложений [2]-[4]. В настоящее время интерес к этому вопросу связан с оценкой предельно допустимых концентраций Rn в нижних этажах жилых зданий и промышленных сооружений при их эксплуатации и проектировании [5]-[7]. В последние несколько десятков лет изучение механизма переноса Rn в грунтах обсуждается в связи с прогнозом сильных землетрясений и горных ударов в шахтах [8]-[12].

Универсальной математической модели, которая бы полно описывала процесс переноса Rn в различных физико-литологических условиях, не существует. Хотя

для частных случаев и при определенных допущениях разработано достаточно много моделей миграции Rn к поверхности [13]-[19].

Используемые методы и исходные данные

С 1997 г. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне работает сеть пунктов мониторинга подпочвенных газов с целью поиска предвестников сильных землетрясений [10], [20]. Пункты сети радонового мониторинга расположены в разных структурных элементах района побережья Авачинского залива, кроме того, каждый пункт имеет свои особенности строения толщи аллювиально-делювиальных отложений, в зоне аэрации которых размещаются датчики Rn [21]. Это, как показывает многолетний опыт, позволяет фиксировать в динамике концентрации Rn индивидуальный отклик в связи с разной реакцией отдельных блоков земной коры на геодеформационные процессы, связанные с подготовкой сильных землетрясений.

На всех пунктах в качестве датчиков Rn используются газоразрядные счетчики типа СБМ-19, позволяющие вести пассивную регистрацию Rn по β излучению короткоживущих продуктов его распада с использованием автоматизированных комплексов регистрации концентрации подпочвенных газов [22], [23]. Как правило, в каждом пункте регистрации работают два датчика, расположенных на разных глубинах (один и два метра).

На основании многолетних экспериментальных наблюдений выявлено два типа отклика в динамике подпочвенного Rn на геодинамические процессы, сопровождающие последнюю стадию подготовки сильного землетрясения района полуострова Камчатка, и имеющих характер предвестников: тип А синфазные аномалии объемной активности радона (ОАР), зарегистрированные в нескольких пунктах сети. Этот тип аномалий связывается с возмущениями в геосреде, условно названными авторами «деформациоными волнами» и подробно описанными в работах [12], [24]. В процессе распространения «деформационные волны» воздействуют на поле Rn и в зависимости от расположения пунктов регистрации относительно границ отдельных блоков и их геолого-тектонических условий отклик в динамике ОАР имеет различную форму (бухтообразные, ступенчатые), а также различную полярность; другой тип Б хорошо выделяемая на общем фоне аномалия определенной формы, регистрируемая в одном пункте сети. По форме записи аномалии типа Б можно объяснить моделью инжекции и распространения радона в потоке воды, разработанной в работах [13], [17]. Впервые аномалия типа Б была зарегистрирована перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г. с M= 7.7. К настоящему времени аномалии типа Б зарегистрированы перед четырьмя землетрясениями. Параметры аномалий и соответствующих землетрясений приведены в таблице.

Две из них зарегистрированы в пункте «Паратунка» PRTR, расположенном в районе Паратунской геотермальной системы [12]. По георадарным данным в районе расположения датчиков в этом пункте выделяется разуплотненный участок, к которому, по данным эманационной съемки, также приурочена повышенная ОАР в

подпочвенном воздухе. Исходя из того, что в первых двух слоях содержание ^{226}Ra не более 10 Бк/кг, то следует допустить, что регистрируемая ОАР на поверхности в пункте PRTR, обеспечивается коллектором ^{226}Ra в породах на больших глубинах.

Таблица

Основные параметры землетрясений и их предвестниковых аномалий типа Б [Main parameters of earthquakes and their precursor anomalies of type B].

№	Землетрясение, дата	M	R, км	H, км	$t_{ан}$, сутки	$t_{упр}$, сутки	$\delta\%$	Λ, c^{-1}	Примечание
1	Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г.	7.7	402	33	11	28	250	0.03	Регистрация в пункте ПРТ
2	Землетрясение 18 сентября 2008 г.	5.9	112	35	23	45	25	0.0022 0.025	Регистрация в пункте ИНС
3	Землетрясение 19 февраля 2015 г.	5.5	56	82	5	7	20	0.06	Регистрация в пункте ПРТ
4	Землетрясение 20 марта 2016 г.	6.4	311	30	4	30	100	0.04	Регистрация в пункте ИНС

Примечание. M – магнитуда по National Earthquake Information Center, (NEIC), R – расстояние от пункта регистрации до эпицентра землетрясения, H – глубина очага землетрясения, $t_{ан}$ – длительность аномалии ,$t_{упр}$ – время упреждения, $\delta\%$ – относительная амплитуда аномалии, Λ – обобщенный кинетический параметр.

Две других аномалии зарегистрированы в пункте INSR, организованном на базе скважины НИС-1 [22]. В пункте INSR по скоростным границам выделяются два слоя, почвенно-пирокластический чехол мощностью 1-3.3 м и переотложенные обвально-взрывные отложения, мощность которых может составлять 20–23 м с уровнем грунтовых вод на глубине 7-8 м.

Большое влияние на миграцию Rn, определяющее различия в отклике разных пунктов на подготовку сильных землетрясений, оказывают: расположение пунктов в различных структурных элементах побережья Авачинского залива; наличие зон разуплотнений, выступающие в роли проводящих коллекторов для флюидов и газов с больших глубин; наличие вертикальных, и горизонтальных неоднородностей верхнего слоя грунта; уровень грунтовых вод.

Для описания поведения Rn в грунтовых водах, а также для интерпретации данных изотопного опробования природных вод в 30-х годах прошлого века была разработана физико-математическая модель переноса Rn в природной водной системе [25], которая в дальнейшем была усовершенствована в работах [13], [17]. Первые попытки математических расчетов и построения модельных кривых аномальных вариаций ОАР в сопоставлении с данными наблюдений были предприняты в работах [12], [20]. В этих работах на основании математической модели из работ [13], [17] было предположено, что механизм возникновения аномалий типа Б связан с распространения радона в потоке подземных вод с полным поперечным перемешиванием.

В настоящей работе авторами поставлена цель - создания программного обеспечения, способное выполнять оптимизацию вычисления ряда параметров, используемых для расчёта ОАР в грунтовых водах на основании аппроксимационной модели из работы [17].

В основу алгоритма для разрабатываемой программы лег следующий расчёт, сведенный к поиску зависимости приращения концентрации (ΔC) от времени в условиях воздействия импульса напряжений разных форм (единичный импульс – дельта-функция Дирака; продолжительное постоянное воздействие с резким фронтом роста напряжения; линейно увеличивающееся напряжение с резкой ступенькой в конце):

$$\begin{aligned} &\Delta C(t) = 0, t \le 0 \\ &\Delta C(t) = \Delta C_{max}(1 - e^{-\Lambda t}), 0 < t < t_s \\ &\Delta C(t) = \Delta C_{max}(1 - e^{-\Lambda t_s})e^{-\Lambda(t - t_s)}, t \ge t_s \end{aligned} \quad , \qquad (1)$$

где: $\Lambda = \lambda_a + \lambda_w + \lambda_p$ – обобщенный кинетический параметр системы c^{-1}; λ_a – постоянная, характеризующая абсорбцию на стенках капилляров; $\lambda_w = Q/V$ – постоянная, характеризующая пропускную способность гидрогеологической системы, Q – расход потока в системе, V – водообменный объем системы; λ_p – постоянная распада радона.

Как показано в [12] обобщенный кинетический параметр системы, в первую очередь, определяется пропускной способности всей гидрогеологической системы района пункта регистрации. Примеры некоторых зарегистрированных аномальных вариаций ОАР типа Б, а также расчетные кривые, выполненные в работе [12] приведены на рис. 1.

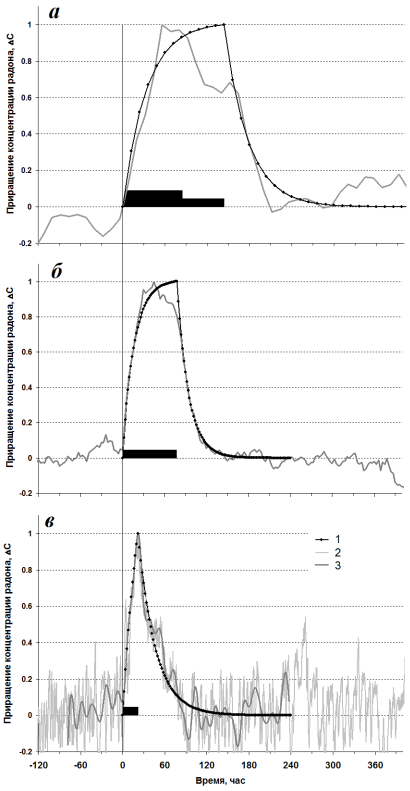


Рис. 1

Рис. 1. Зарегистрированные в подпочвенном радоне предвестниковые аномалии типа Б. Все кривые нормированы на максимум. Черным прямоугольником отмечено предполагаемое время воздействия импульса напряжения. *а – Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с M = 7.7, б – землетрясение Авачинского залива 19 февраля 2015 г. с M = 5.5, в – землетрясение 20 марта 2016 г.* 1 *расчетные кривые,* 2 *исходные данные,* 3 *– кривые, отфильтрованные фильтром высоких частот с граничной частотой* 0.07 час$^{-1}$.

[Figure 1. Harbinger anomalies of type B recorded in subsoil radon. All curves are normalized to the maximum. The black rectangle marks the estimated time of exposure to the voltage pulse. a – December 5, 1997 Kronotskoe earthquake with M = 7.7, b – February 19, 2015 Avacha Bay earthquake with M = 5.5, c – March 20, 2016 earthquake. 1 calculated curves, 2 initial data, 3 – filtered curves high-pass filter with a cutoff frequency of 0.07 h^{-1}.]

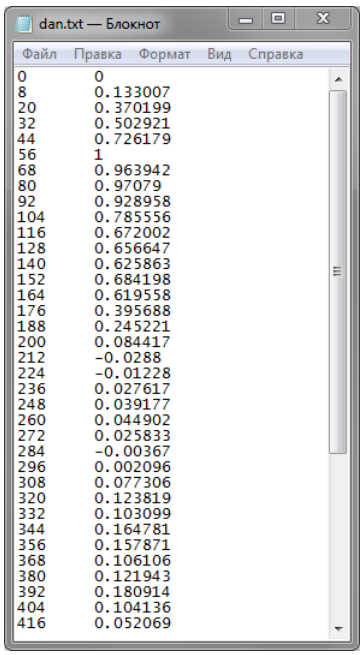
Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальной кривых получено методом подбора.

В разработанном на языке C++ программном обеспечении для сопоставления модельных и аппроксимационных кривых выбран расчет площади под ними. Для вычисления площади используется численный метод правых прямоугольников. Так как исходные данные имеют определенный дискретный шаг, то и площадь кривой вычисляется с идентичным шагом для соблюдения порядка точности. Параметр Λ так же вычисляется методом подбора. С каждой итерацией цикла программы искомый параметр увеличивается на 0.00001 и в момент минимальной разницы между площадями под кривыми цикл останавливается с выводом расчетных значений. Кроме Λ программа рассчитывает величину импульса напряжения σ_0, воздействие которого, согласно работе [17], вызывает инжекцию радона в водный поток. С учетом предварительной нормировку данных (C_{max}=1) параметр σ_0 можно найти с помощью известной Λ:

$$\sigma_0 = \frac{\Lambda}{\lambda_p \gamma}, \tag{2}$$

Описание работы программы

На первом этапе на вход программа получает файл формата txt с заранее нормированными на максимум данными, представляющий собой массив пар значений, где первое значение отвечает за временную точку, второе за реальные данные концентрации Rn (рис. 2).



0	0
8	0.133007
20	0.370199
32	0.502921
44	0.726179
56	1
68	0.963942
80	0.97079
92	0.928958
104	0.785556
116	0.672002
128	0.656647
140	0.625863
152	0.684198
164	0.619558
176	0.395688
188	0.245221
200	0.084417
212	-0.0288
224	-0.01228
236	0.027617
248	0.039177
260	0.044902
272	0.025833
284	-0.00367
296	0.002096
308	0.077306
320	0.123819
332	0.103099
344	0.164781
356	0.157871
368	0.106106
380	0.121943
392	0.180914
404	0.104136
416	0.052069

Рис. 2. Пример содержания файла нормированных данных ОАР.
[Figure 2. An example of the content of a normalized VAR data file.]

Для выбора файла из каталога используется диалоговое окно, в котором пользователем так же вводятся эмпирически определяемые параметры t_1 (время пика/начала затухания аномалии) и t_2 (время завершения аномалии) (рис. 3).

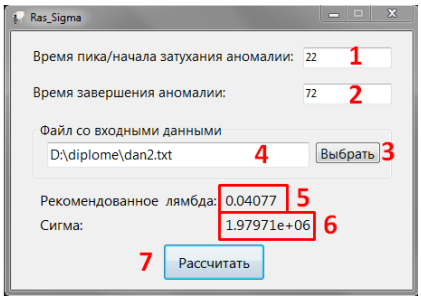


Рис. 3. Пример отображения диалогового окна выбора файла (3, 4) и ввода параметров аномалии (1, 2); 5, 6 – результаты работы программы после нажатия пользователем кнопки «Рассчитать» (7).

[Figure 3. An example of displaying a file selection dialog box (3, 4) and entering anomaly parameters (1, 2); 5, 6 - the results of the program after the user clicks the "Calculate"button (7).]

Для выполнения расчёта необходимо нажать на кнопку «Рассчитать».

Далее программа обрабатывает файл, внося каждый столбец в отдельные массивы данных. Таких массивов три: массив данных (dan), массив времени для данных (mastime) и массив времени для кривой аппроксимации (mas_t). При чём mas_t заполняется через цикл for последовательно, где каждый элемент равен порядковому номеру итерации минус 1. Параллельно с внесением в массив исходных данных, вычисляется максимальное значение из массива dan. Далее программой выполняется расчёт количество разбиений для дальнейшей работы метода прямоугольников.

На этом этапе выполняется расчёт площади полинома исходных данных, численным методом правых прямоугольников. После начинается основной цикл программы while, который содержит в себе два параметра для выхода из него: masPE[0] и masPE[1] – это элементы двухэлементного массива, которые по умолчанию оба равны 100. По ходу работы цикла эти ячейки переписываются каждый раз. В них записываются разность площадей под модельной и экспериментальной кривой, как только два раза подряд разность станет равной нулю или ниже него, то происходит выход из цикла и переход к новому этапу.

Каждую итерацию цикла параметр Λ (lam) увеличивается на 0.00001. Такой шаг выбран из-за достаточной скорости вычислений. Для каждого lam на каждой итерации цикла высчитывается площадь под графиком модельной кривой и сравнивается с площадью под графиком экспериментальных данных. Массив данных с модельной кривой формируется каждую новую итерацию цикла.

На третьем этапе после завершения основного цикла mas[] (массив модельных данных) записывается в файл «approx.txt» который создаётся в папке с программой автоматически. После на консоль выводится сообщение с рекомендованными

параметрами. Файлы, с которыми производилась работа, закрываются и в консоль автоматически передаётся сообщение об открытии этих файлов в программе «Gnuplot» для построения графиков.

Результат работы программы – рекомендованные параметры, подобранные автоматически, с помощью метода площадей отображаются в диалоговом окне выбора файла (рис. 3).

График демонстрируется пользователю в отдельном окне (рис. 4).

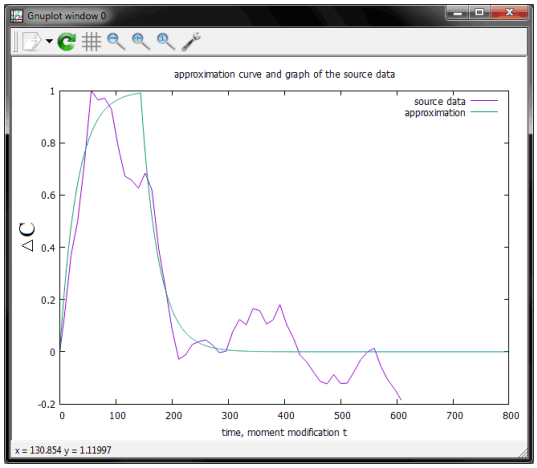


Рис. 4. Пример рабочего окна Gnuplot с демонстрацией кривых исходных нормированных данных ОАР и результата работы программы.

[Figure 4. An example of the Gnuplot working window with a demonstration of the curves of the initial normalized VAR data and the result of the program.]

Преимуществом программы является отсутствие необходимости перезапуска для выполнения повторного расчёта для нового набора данных. Так, вернувшись к основному окну программы, можно выбрать новый файл и провести необходимые расчёты заново.

Блок схема работы программы приведена на рис. 5.

Разработанная программа позволяет выполнять моделирование аномальных вариаций ОАР, которые регистрируются на сети пунктов Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона и рассчитывать основные параметры, описывающих эти аномалии. Хотя вертикальное движение подземных вод по дизъюнктивным зонам, в отличие от горизонтального случая, полностью не может удовлетворять условиям модели [17], но на качественном уровне данная математическая модель, положенная в основу программы, может быть применена к зарегистрированным аномалиям.

Сравнения экспериментальных и модельных кривых предвестниковых аномалий типа Б подтверждают возможность их возникновения по модели отклика концентрации радона в потоке грунтовых вод с полным поперечным перемешиванием на продолжительное постоянное воздействие импульса напряжения.

Рис. 5. Блок-схема работы программы для моделирования аномальных вариаций ОАР на основе механизма его инжекции в поток грунтовых вод с полным поперечным перемещшиванием.

[Figure 5. Block diagram of the program for modeling anomalous VAR variations based on the mechanism of its injection into the groundwater flow with full transverse displacement.]

Заключение

Соотношение параметров Λ для разных случаев возникновения аномалий ОАР перед землетрясениями позволяет исследователям получить дополнительные сведения о энергии сейсмических событий и их особенностях, что может положительно сказаться на точности прогноза таких событий в дальнейшем. Вычисляемый параметр σ_0 и его связь с вариациями ОАР требуют дальнейшего изучения.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов в отношении авторства и публикации.

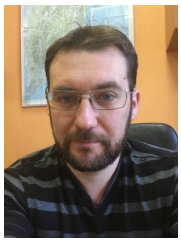
Авторский вклад и ответственность. Все авторы внесли свой вклад в эту статью. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательный вариант рукописи был одобрен всеми авторами.

Список литературы

1. Кобрунов А. И. *Математические методы моделирования в прикладной геофизике (избранные главы)*, Функционально-аналитические основы, Т. 1. Ухта: УГТУ, 2014. 224 с.

2. Grammakov A. G. On the influence of same factors in the spreading of radioactive emanations under natural conditions, *Zhurn. Geofiziki*, 1936. vol. 6, pp. 123-148.
3. Граммаков А. Г., Никонов А. И., Тарфеев Г. П. *Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд.* М.: Госгеолтехиздат, 1957. 610 с.
4. Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. *Радиоактивные методы разведки.* Л.: Недра, 1965. 759 с.
5. Микляев П. С., Зиангиров Р. С. Влияние природных факторов на плотность потока радона из грунта / *Сергеевские чтения*, Т. 3. М., ГЕОС, 2001, С. 118-123.
6. Яфасов А. Я., Мирахмедова Н. М., Яфасов А. А. Радоновое поле Ташкентского Мегаполиса, *АНРИ*, 2003.. Т. 32, № 1, С. 29-33.
7. Цапалов А. А. Результаты долговременных исследований закономерностей поведения ОА и ЭРОА радона в зданиях московского региона, *АНРИ*, 2011. Т. 61, № 3, С. 52-64.
8. Булашевич Ю. П., Уткин В. И., Юрков А. К., Николаев В. В. Изменение концентрации радона как предвестник горных ударов в глубоких шахтах, *Горный журнал*, 1996. № 6, С. 19-22.
9. Уткин В. И., Юрков А. К. Радон и проблема тектонических землетрясений, *Вулканология и сейсмология*, 1997. № 4, С. 82-94.
10. 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. 22-31.
11. Яковлева В. С., Каратаев В. Д. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды, *Вулканология и сейсмология*, 2007.. № 1, С. 74-77.
12. Фирстов П. П., Макаров Е. О. *Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения.* П.-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2018. 147 с.
13. Гудзенко В. В., Дубинчук В. Т. *Изотопы радия и радон в природных водах.* М.: Наука, 1987. 45 с.
14. Бондаренко В. М., Иванова Т. М. Перенос радона в горном массиве: модели и экспериментальные данные. Статья I, *Изв. вузов. Геология и разведка*, 1999. № 4, С. 96-107.
15. Паровик Р. И. *Математическое моделирование неклассической теории эманационного метода.* П.-Камчатский: КамГУ им. В. Беринга, 2014. 80 с.
16. Varhegyi A., Baranyi I., Somogyi G. A. Model for the vertical subsurface radon transport in «geogas» microbubbles, *Geophys. Transactions*, 1986. vol. 32, no. 3, pp. 235-253.
17. Dubinchuk V. T. Radon as a precursor of earthquakes / *Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption*, Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9-12 September 1991. Vienna, 1991, pp. 6-22.
18. Etiope G., Martinelli G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2002. vol. 129, pp. 185-204.
19. Yakovleva V. S., Parovik R. I. Solution of diffusion-advection equation of radon transport in many-layered geological media, *Nukleonika*, 2010. vol. 55, no. 4, pp. 601-606.
20. Макаров Е. О. *Отклик в динамике подпочвенного радона на подготовку сильных землетрясений Камчатки и северо-западной окраины Тихого океана*, автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. П.-Камчататский, 2017. 22 с.
21. Фирстов П. П., Макаров Е. О. Реакция подпочвенного и растворенного в подземных водах радона на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры, *Сейсмические приборы*, 2015. Т. 51, № 4, С. 58-80.
22. 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. 5-14.
23. Фирстов П. П., Макаров Е. О., Акбашев Р. Р. Мониторинг концентрации почвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в связи с прогнозом сильных землетрясений, *Сейсмические приборы*, 2015. Т. 51., № 1, С. 60-80.
24. Фирстов П. П. и др. Поиск предвестниковых аномалий сильных землетрясений по данным мониторинга подпочвенных газов на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне, *Геосистемы переходных зон*, 2018. Т. 2, № 1, С. 16-32.
25. Огильви А. Н. О каптаже радиоактивных вод и о колебаниях их радиоактивности в зависимости от дебита, *Изд. Бальнеологич. ин-та КМВ*, 1928. Т. 6, С. 85–93.

Каткова Глафира Андреевна – магистрант Камчатского государственного университета имени Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский, Россия ORCID 0000-0002-9781-7249.



Макаров Евгений Олегович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией акустического и радонового мониторинга, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия ORCID 0000-0002-0462-3657.

Паровик Роман Иванович – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования физических процессов, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия; профессор кафедры информатики и математики, КамГУ им. Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский, Россия ORCID 0000-0002-1576-1860.

MSC 34A05, 65D17 Research Article

Computer program for modeling anomalous variations in radon volumetric activity based on the mechanism of its injection into the groundwater flow

G. A. Katkova[1], *E. O. Makarov*[1,2], *R. I. Parovik*[1,3]

[1] Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Pogranichnaya str., 4, Russia

[2] Kamchatsky branch of the Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences Petropavlovsk-Kamchatsky, Piipa Blvd., 9, Russia

[3] Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 684034, Paratunka, Mirnaya Str., 7, Russia

E-mail: ice@emsd.ru

Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing area has a network of subsoil gas monitoring stations. During the operation of the network, anomalies were registered in the field of subsoil gases, which precede strong earthquakes with a magnitude of M> 5. According to morphological features, they are divided into two types A and B. The paper describes the developed software for modeling the occurrence of radon anomalies based on a mathematical model of isotope injection under the influence of voltage pulses into a groundwater flow with complete transverse mixing.

Key words: radon, radon anomaly, precursor anomaly, mathematical modeling, program, earthquake, forecast

DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-165-178

Original article submitted: 20.10.2022 Revision submitted: 18.11.2022

For citation. Katkova G. A., Makarov E. O., Parovik R. I. Computer program for modeling anomalous variations in radon volumetric activity based on the mechanism of its injection into the groundwater flow. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, **40**: 3, 165-178. DOI: 10.26117/2079-6641-2022-40-3-165-178

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru)

© Katkova G. A., Makarov E. O., Parovik R. I., 2022

Funding. This work was supported financially by the President of the Russian Federation grant No. MD-758.2022.1.1 and partially supported by the RFBR grant No. 20-05-00493.

References

[1] Kobrunov A. I. Matematicheskiye metody modelirovaniya v prikladnoy geofizike (izbrannyye glavy) [Mathematical modeling methods in applied geophysics (selected chapters)]. Part 1. Funktsional'no-analiticheskiye osnovy [Functional-analytical foundations], Ukhta, USTU, 2014, 224 (In Russian).

[2] Grammakov A. G. On the influence of same factors in the spreading of radioactive emanations under natural conditions, Zhurn. Geofiziki, 1936, 6, 123-148.

[3] Grammakov A. G., Nikonov A. I., Tarfeyev G. P. Radiometricheskiye metody poiskov i razvedki uranovykh rud [Radiometric methods of prospecting and exploration of uranium ores], Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1957, 610 (In Russian).

[4] Novikov G. F., Kapkov YU. N. Radioaktivnyye metody razvedki [Radioactive intelligence methods], Leningrad, Nedra, 1965, 759 (In Russian).

[5] Miklyayev P. S., Ziangirov R. S. Vliyaniye prirodnykh faktorov na plotnost' potoka radona iz grunta, Sergeyevskiye chteniya, Moscow GEOS, 2001, 3, 118-123 (In Russian).

[6] Yafasov A. Ya., Mirakhmedova N. M., Yafasov A. A. Radonovoye pole Tashkentskogo Megapolisa, Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy. 2003, 32:1, 29-33 (In Russian).

[7] Tsapalov A. A. Rezul'taty dolgovremennykh issledovaniy zakonomernostey povedeniya OA i EROA radona v zdaniyakh moskovskogo regiona, Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy, 2011, 61:3, 52-64 (In Russian).

[8] Bulashevich Yu. P., Utkin V. I., Yurkov A. K., Nikolayev V. V. Izmeneniye kontsentratsii radona kak predvestnik gornykh udarov v glubokikh shakhtakh, Gornyy zhurnal, 1996, 6, 19-22 (In Russian).

[9] Utkin V. I., Yurkov A. K. Radon i problema tektonicheskikh zemletryaseniy, Vulkanologiya i seysmologiya, 1997, 4, 82-94 (In Russian).

[10] Firstov P. P. Monitoring obyemnoy aktivnosti podpochvennogo radona (^{222}Rn) na Paratunskoy geotermal'noy sisteme v 1997-1998 gg. s tsel'yu poiska predvestnikov sil'nykh zemletryaseniy Kamchatki, Vulkanologiya i seysmologiya, 1999, 6, 22-31 (In Russian).

[11] Yakovleva V. S., Karataev V. D. Radon flux density at the earth's surface as a possible indicator of the stress and strain state of the geological environment, Journal of Volcanology and Seismology. 2007, 1:1, 67-70.

[12] Firstov P. P., Makarov Ye.O. Dinamika podpochvennogo radona na Kamchatke i sil'nyye zemletryaseniya [Dynamics of subsoil radon in Kamchatka and strong earthquakes], P.-Kamchatskiy, KamGU im. Vitusa Beringa, 2018, 147 (In Russian).

[13] Gudzenko V.V., Dubinchuk V.T. Izotopy radiya i radon v prirodnykh vodakh [Isotopes of radium and radon in natural waters], Moscow, Nauka, 1987, 45 (In Russian).

[14] Bondarenko V. M., Ivanova T. M. Perenos radona v gornom massive: modeli i eksperimental'nyye dannyye. Stat'ya I, Izv. vuzov. Geologiya i razvedka, 1999, 4, 96-107 (In Russian).

[15] Parovik R.I. Matematicheskoye modelirovaniye neklassicheskoy teorii emanatsionnogo metoda [Mathematical modeling of the non-classical theory of the emanation method], Petropavlovsk-Kamchatskiy, KamGU im. V. Beringa, 2014, 80 (In Russian).

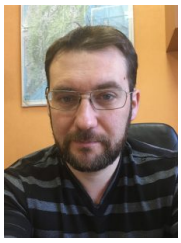
[16] Varhegyi A., Baranyi I., Somogyi G. A. Model for the vertical subsurface radon transport in «geogas» microbubbles, Geophys. Transactions, 1986, 32:3, 235-253.

[17] Dubinchuk V. T. Radon as a precursor of earthquakes, Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption, Proceedings of an Advisory Group Meeting held in Vienna, Vienna, 9-12, September 1991, Vienna, 1991, 6-22.

[18] Etiope G., Martinelli G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview, Phys. Earth Planet. Inter., 2002, 129, 185-204.

[19] Yakovleva V. S., Parovik R. I. Solution of diffusion-advection equation of radon transport in many-layered geological media, Nukleonika, 2010, 55:4, 601-606.
[20] Makarov Ye. O. Otklik v dinamike podpochvennogo radona na podgotovku sil'nykh zemletryaseniy Kamchatki i severo-zapadnoy okrainy Tikhogo okeana [Response in the dynamics of subsoil radon to the preparation of strong earthquakes in Kamchatka and the northwestern margin of the Pacific Ocean], avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Petropavlovsk-Kamchatatskiy, 2017. 22 (In Russian).
[21] Firstov P. P., Makarov Ye. O. Response of subsoil and dissolved radon in groundwater to changes in the stress-strain state of the earth's crust, Seysmicheskiye pribory, 2015, 51:4, 58-80 (In Russian).
[22] Makarov Ye. O., Firstov P. P., Voloshin V. N. Instrumentation complex for recording the concentration of subsoil gases in order to search for precursor anomalies of strong earthquakes in South Kamchatka, Seysmicheskiye pribory, 2012, 48:1, 5-14 (In Russian).
[23] Firstov P. P., Makarov Ye. O., Akbashev R. R. Monitoring kontsentratsii pochvennykh gazov na Petropavlovsk-Kamchatskom geodinamicheskom poligone v svyazi s prognozom sil'nykh zemletryaseniy, Seysmicheskiye pribory, 2015, 51:1, 60-80 (In Russian).
[24] Firstov P. P. et. al. Search for precursor anomalies of strong earthquakes based on monitoring data of subsoil gases at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic test site, Geosistemy perekhodnykh zon, 2018, 2:1, 16-32 (In Russian).
[25] Ogil'vi A. N. O kaptazhe radioaktivnykh vod i o kolebaniyakh ikh radioaktivnosti v zavisimosti ot debita, Izd. Bal'neologich. in-ta KMV, 1928, 6, 85–93 (In Russian).

Katkova Glafira Andreevna – Master student of Vitus Bering Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia ORCID 0000-0002-9781-7249.



Makarov Evgeny Olegovich – PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher, Acting Head, Laboratory of Acoustic and Radon Monitoring, Kamchatka Branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia ORCID 0000-0002-0462-3657.

Parovik Roman Ivanovich – DSc (Phys. & Math.), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory for Modeling Physical Processes, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Paratunka, Russia; Professor of the Department of Informatics and Mathematics, KamGU named after. Vitus Bering, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia ORCID 0000-0002-1576-1860.