

Комплексные исследования геодинамической активности локальных территорий Азово-Черноморского побережья Краснодарского края и версии прогноза экстремальных ситуаций

И. С. Подымов*, Т. М. Подымова, Н. В. Есин

*Южное отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Геленджик, Россия*

**e-mail: ipodymov@inbox.ru*

Поступила 18.09.2019 г.; принята к публикации 21.02.2020 г.; опубликована 25.03.2020 г.

Представлены результаты исследований современных движений земной коры и геодинамической активности Азово-Черноморского побережья Краснодарского края. Сделан обзор существующих в мировой практике методов раннего обнаружения сейсмической опасности, базирующихся на использовании данных комплексных спутниковых систем. Рассмотрен внедренный в Институте океанологии им. П. П. Ширшова альтернативный метод отслеживания экстремальных сейсмических ситуаций в Керченско-Таманском регионе. В основе метода лежат наблюдения за вариациями радона в приземной атмосфере. Произведен анализ и статистическая обработка данных спутникового мониторинга геодинамической активности земной поверхности и 4-летнего непрерывного мониторинга вариаций объемной активности радона в приземном слое воздуха в регионе исследований. Результаты обработки сопоставлены с произошедшими за время мониторинга сейсмическими событиями, информация о которых получена от Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра. Сделаны следующие заключения. Технологии спутниковых измерений геодинамической активности позволяют оценить масштабы протекающих процессов и тектоническую стабильность наблюдаемых территорий статистически. Мгновенная оценка возникающих деформаций земной коры возможна только посредством мониторинга вариаций радона в приземной атмосфере. Вынос на поверхность земли радиоактивного радона приводит к активизации процессов в атмосфере, ответственных за появление краткосрочных предвестников землетрясений. На основе данных мониторинга объемной активности радона и произошедших за период мониторинга землетрясений предложен алгоритм прогноза экстремальных ситуаций в регионе исследований.

Ключевые слова: Азово-Черноморское побережье, объемная активность радона, долговременный мониторинг, движения земной коры, геодинамическая активность, прогноз экстремальных ситуаций.

© Подымов И. С., Подымова Т. М., Есин Н. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: исследования выполнены по теме № 0149-2019-0014 «Морские природные системы Черного и Азовского морей: эволюция и современная динамика гидрофизических, гидрохимических, биологических, береговых и литодинамических процессов».

Для цитирования: Подымов И. С., Подымова Т. М., Есин Н. В. Комплексные исследования геодинамической активности локальных территорий Азово-Черноморского побережья Краснодарского края и версии прогноза экстремальных ситуаций // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 47–59. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-47-59

Comprehensive Studies of Geodynamic Activity in Local Territories of the Azov and Black Sea Coast of the Krasnodar Region and Versions of Extreme Situation Forecast

I. S. Podymov*, T. M. Podymova, N. V. Esin

P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Gelendzhik, Russia

*e-mail: ipodymov@inbox.ru

Submitted 18.09.2019; revised 21.02.2020; published 25.03.2020

The paper presents the results of studies of current earth's crust movements and geodynamic activity of the Azov and Black Sea coast of the Krasnodar region. Existing internationally adopted methods of seismic hazard early detection based on the use of data obtained from complex satellite systems were overviewed. An alternative method for monitoring of extreme seismic situations in the Krasnodar region introduced at the Institute of Oceanology was considered. The method is based on observations of radon variations in the surface atmosphere. The analysis and statistical processing of data from satellite monitoring of geodynamic activity of the earth's surface and 4-year continuous monitoring of variations in the volume activity of radon in the ground air of the region under research were performed. The results of processing were matched to seismic events that occurred during monitoring; information about the events was received from the European-Mediterranean Seismological Centre. The conclusions are as follows. Satellite measurements of geodynamic activity allow us to perform a statistical estimate of the scale of ongoing processes and tectonic stability of the observed territories. Instantaneous estimate of the resulting crustal deformations is possible only by controlling radon variations in the surface atmosphere. The release of radioactive radon to the earth's surface leads to activation of processes in the atmosphere, which are responsible for appearance of short-term precursors of earthquakes. Based on the specific events occurred during radon monitoring, an algorithm has been proposed to forecast extreme situations in the region under study.

Keywords: Azov and Black sea coast, radon volumetric activity, long-term monitoring, earth's crust movements, geodynamic activity, forecasts of extreme situations.

Acknowledgments: the research is performed on topic No. 0149-2019-0014 “Marine natural systems of the Black and Azov Seas: Evolution and modern dynamics of hydro-physical, hydrochemical, biological, coastal and lithodynamic processes”.

For citation: Podymov, I.S., Podymova, T.M. and Esin, N.V., 2020. Comprehensive Studies of Geodynamic Activity in Local Territories of the Azov and Black Sea Coast of the Krasnodar Region and Versions of Extreme Situation Forecast. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 47–59. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-47-59 (in Russian).

Исследование современных движений земной коры и геодинамической активности Азово-Черноморского побережья Краснодарского края и Крымского региона имеет особое значение. Данный район характеризуется сложной геологической структурой, состоящей из тектонических структур первого и высших порядков, которые находятся в смешанном взаимодействии [1]. Высокая геодинамическая активность проявляется серией разрывных нарушений, пересекающих Таманский и Керченский полуострова. В этом районе находится значительное количество потенциальных очагов землетрясений, представляющих собой наиболее опасные в сейсмическом отношении участки сейсмогенерирующих геологических структур, которые проявляли себя в прошлом через сейсмические подвижки большой магнитуды. На рис. 1 показана схема разрывных нарушений в регионе по работе [2] и потенциальных очагов землетрясений по данным Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (ЕССЦ). Линии сейсмоактивных разломов перенесены на карту региона из представленного в работе [2, с. 65] рис. 11, а. Большие скорости горизонтальных перемещений и вертикальных движений земной коры способствуют возникновению экстремальных ситуаций вплоть до общего подъема (опускания) земной поверхности.

Практическая важность исследований обусловлена наличием в регионе значимых объектов инфраструктуры: перевалочных терминалов нефти и аммиака, морских портов, транспортного перехода через Керченский пролив и т. п. С точки зрения фундаментальной науки большое значение имеет разработка обоснованных методов прогноза экстремальных ситуаций.

Цель работы – дать обзор существующих методов мониторинга геодинамической активности локальных территорий, представить некоторые результаты исследований и версии прогноза экстремальных ситуаций.

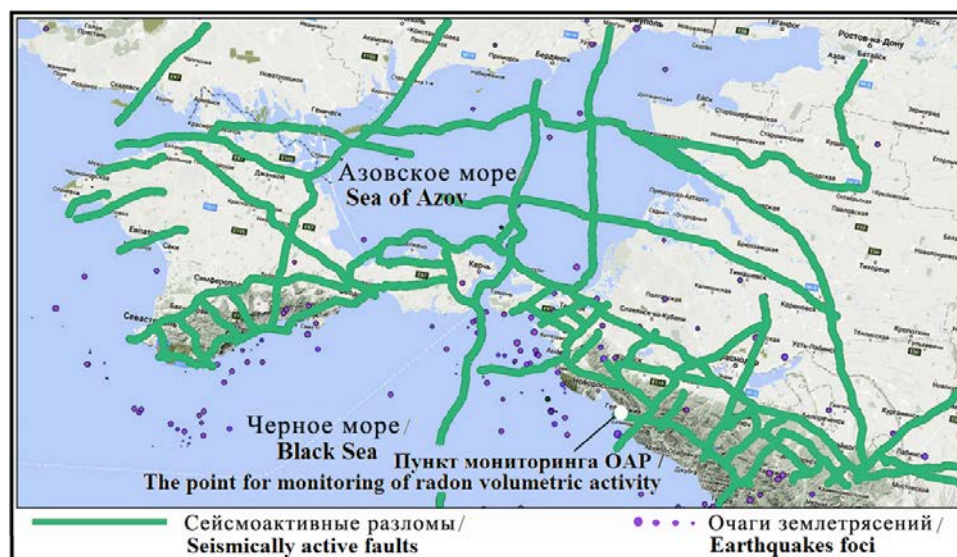


Рис. 1. Схема разрывных нарушений и потенциальных очагов землетрясений в регионе исследований [3]

Fig. 1. Diagram of faults and potential earthquakes foci in the region under study [3]

Методика исследований. В мировой практике для мониторинга геодинамической активности территорий и создания комплексных систем раннего обнаружения сейсмической опасности широко используются технологии спутниковых измерений. Аналогичная система прямого измерения деформаций земной коры организована на Азово-Черноморском побережье Краснодарского края [1]. В ее составе 10 стационарных спутниковых геодинамических пунктов (СГП), установленных в сейсмоактивных районах. Шесть из этих пунктов находятся на косе Чушка, в Темрюке, Тамани, Анапе, два – в Геленджике (рис. 2).

Эта сеть охватывает фрагмент сейсмоактивной покровно-складчатой зоны Северо-Западного Кавказа и характеризует движение участков Керченско-Таманского периклинального прогиба. Параметры абсолютного перемещения в международной координатной системе *ITRF2008* [4, 5] опорного СГП, установленного в станице Зеленчукская (Карачаево-Черкесия), выбраны в качестве регионального вектора. Абсолютные значения перемещений всех перечисленных СГП в системе *ITRF2008* фиксируются непосредственными измерениями в пунктах мониторинга. Локальные сдвиги каждого СГП относительно опорной станции рассчитываются при обработке полученных данных. Алгоритм исследований по этой схеме и основные критерии выбора опорной станции подробно рассмотрены в работе [1]. Движение всех пунктов мониторинга согласуется с движением международных станций в Крыму и на Северо-Западном Кавказе.

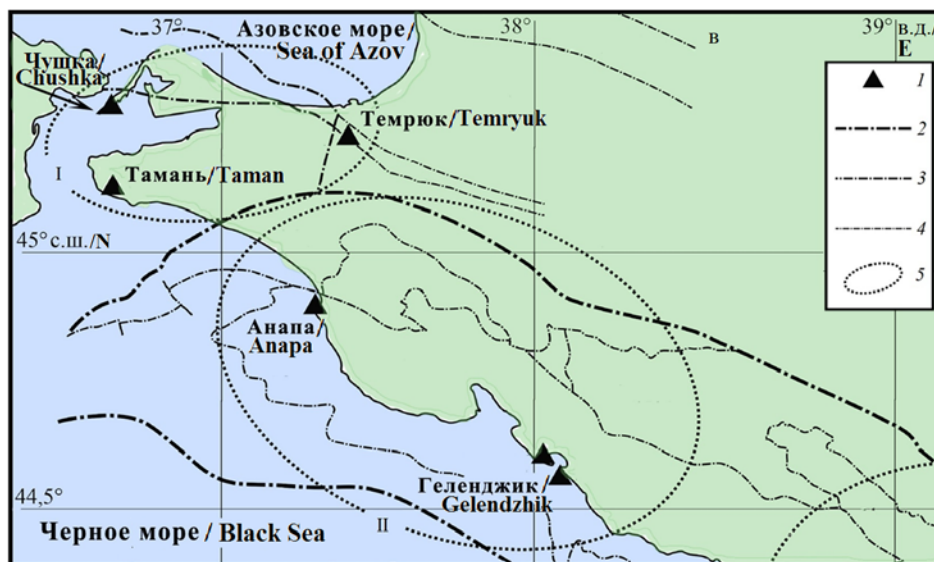


Рис. 2. Схема сети СГП GPS/Глонасс Азово-Черноморского побережья РФ: 1 – спутниковые геодинамические пункты; 2–4 – границы тектонических структур: 2 – первого порядка; 3 – второго порядка; 4 – третьего порядка; 5 – зоны сейсмической активности (I – Керченско-Таманская; II – Анапско-Новороссийская)

Fig. 2. Scheme of placement of satellite geodynamic points GPS/GLONASS at the Azov and Black Sea coast of Russia: 1 – satellite geodynamic points; 2–4 – borders of tectonic structures: 2 – first order; 3 – second order; 4 – third order; 5 – seismic activity zones (I – that of Kerch-Taman region; II – that of Anapa-Novorossiysk region)

Институт океанологии РАН отслеживает экстремальные ситуации, связанные с геодинамической активностью в Крымско-Таманском регионе, используя альтернативные технологии. С 2011 по 2015 гг. проводились полевые наблюдения, сбор и лабораторная обработка материалов. А с января 2016 г. в границах активного Маркхотского разлома (рис. 1) осуществляется непрерывный мониторинг флуктуаций объемной активности радона (ОАР) в приземной атмосфере. Активация разломов приводит к изменению проницаемости земной коры, увеличению миграции газов и эманации радона из недр. Здесь следует оговориться. В работе под термином «радон» подразумевается изотоп ^{222}Rn . Эманации торона (^{220}Rn) и актинона (^{219}Rn) не способны к миграции на сколько-нибудь заметные расстояния от ядер-предшественников ввиду короткого времени их полураспада (54.5 и 3.92 с). На финальной стадии процесса подготовки землетрясения резко увеличивается поток радона из земной коры [6]. Физикой этого процесса обусловлен выбранный метод мониторинга геодинамической активности по флуктуациям радона в приземной атмосфере. Вынос на поверхность радиоактивного радона приводит к активизации в атмосфере вторичных процессов-предвестников зарождающейся экстремальной ситуации. То есть первичным индикатором начала деформаций земной коры является увеличение объемной активности радона в приземном воздухе. Подробное описание проведенных авторами исследований, подтверждающих приоритет концентрации радона в приземной атмосфере как индикатора начала деформаций земной коры, приведено в работе [3].

Для сравнения результатов исследований геодинамической активности земной поверхности в Крымско-Таманском регионе, полученных двумя описанными способами, сопоставлены некоторые фрагменты наблюдений. На рис. 3 представлены графики движений СГП Темрюк за 2015–2016 гг. и вариации ОАР относительно среднего многолетнего значения за январь – сентябрь 2016 г.

Исходные траектории горизонтальных движений (E , N) СГП Темрюк (рис. 3) имеют хаотичный характер. Это легко объясняется рядом объективных причин: неравномерным вращением Земли, погрешностями систем, осуществляющих сбор измерений, дифференциальные коррекции и мониторинг космических аппаратов. Сглаженные траектории горизонтальных перемещений также малоинформативны. Флуктуации траектории вертикального движения (dH) СГП фиксируются точнее. Но ни горизонтальные, ни вертикальные движения СГП не позволяют связать его текущее состояние с зафиксированными сейсмическими событиями. Самую ценную информацию несут тренды за длительный период спутниковых измерений. Они дают среднегодовые скорости движения тектонической плиты, на поверхности которой расположен СГП, в горизонтальном и вертикальном направлениях. Например, обработка приведенных на рис. 3 данных (за полтора года наблюдений) показывает, что Темрюк перемещается на восток со скоростью 27.33 мм/год, на север – со скоростью 11.73 мм/год, вертикальное перемещение (опускание поверхности) составляет 7.73 мм/год.

Вариации ОАР (рис. 3) в границах Маркхотского разлома относительно среднего многолетнего значения показывают, что каждому представленному

на графике землетрясению предшествовал выброс радона из земной коры. Землетрясения произошли (слева направо) в окрестностях Абинска, Новороссийска, Славянска и имели магнитуду $M3$, $M3.6$, $M3.4$ соответственно. Из сказанного можно сделать предварительный вывод: выбросы радона в атмосферу служат предвестником зарождающегося землетрясения.

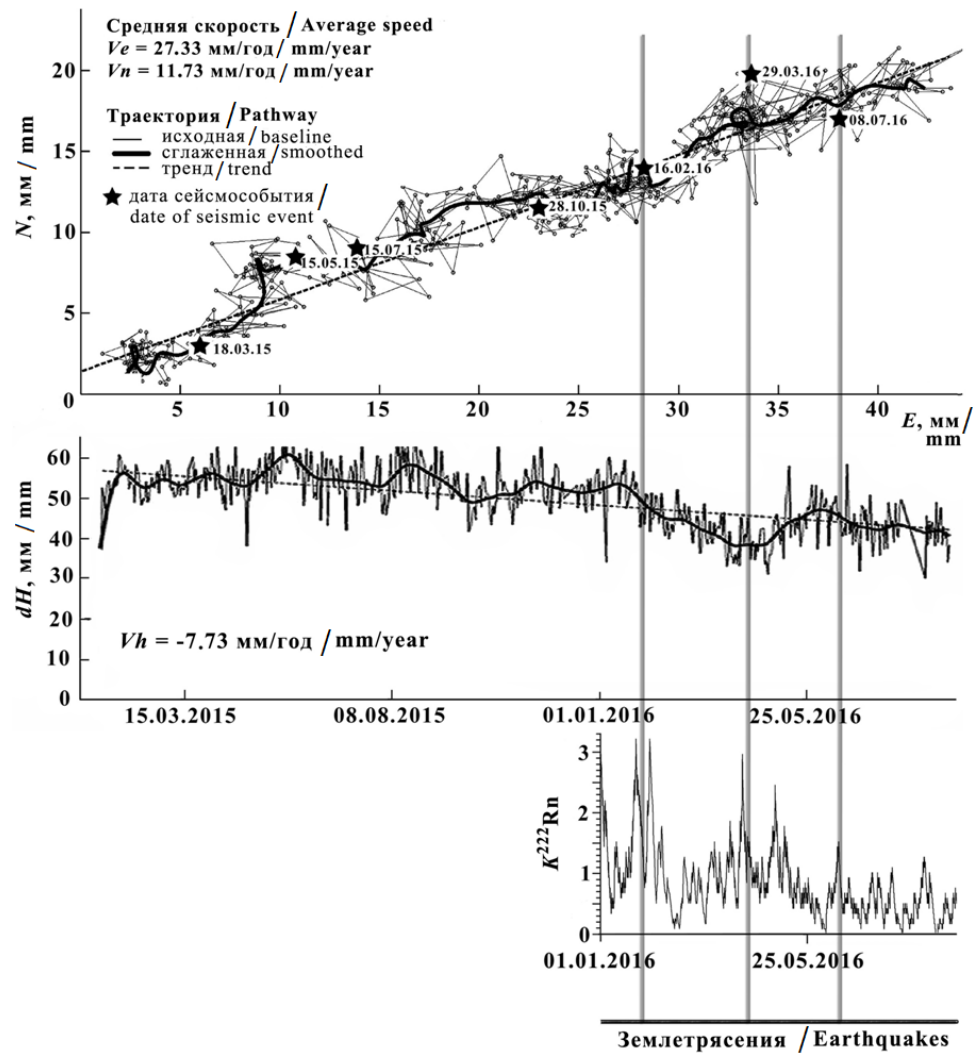


Рис. 3. Горизонтальное и вертикальное движение СГП Темрюк в 2015–2016 гг. в системе *ITRF2008*: E , N , dH – смещение СГП в восточном, северном и вертикальном направлениях; V_e , V_n , V_h – средние скорости смещения по тем же направлениям; $K^{222}\text{Rn}$ – вариации радона в границах Маркхотского разлома относительно среднего многолетнего значения

Fig. 3. Horizontal and vertical movements of the Temryuk SGP during 2015–2016 in the *ITRF2008* system: E , N , dH – displacement of the SGP eastwards, northwards and vertically; V_e , V_n , V_h – average displacement rates in the above mentioned directions; $K^{222}\text{Rn}$ – variations of radon relative to the average long-term value in the surface atmosphere of the Markhotsky fault

Метод мониторинга флуктуаций радона в приземном слое атмосфере. Классические (сцинтилляционные) методы фиксируют концентрацию радона по энергии распада альфа-частиц. Альфа-частицы, несмотря на высокую энергию распада (5.49 МэВ), обладают пониженной проникающей способностью. По этой причине приборы, фиксирующие ОАР по энергии распада альфа-частиц, имеют повышенную погрешность, связанную с вариациями метеорологических параметров и прочими помехами на пути распространения ионизирующего излучения. Зафиксированные таким методом значения ОАР не отражают реальной концентрации радона и могут стать причиной существенных ошибок при серьезных научных исследованиях.

В цепочку распада радона ^{222}Rn входят изотопы свинца ^{214}Pb и висмута ^{214}Bi , излучающие при распаде бета-частицы с энергиями 351 и 609 кэВ соответственно. Периоды полураспада этих изотопов составляют 26.8 и 19.7 мин. Уравнение эквивалентной равновесной ОАР для неравновесной смеси короткоживущих дочерних продуктов связывает величину скрытой энергии ОАР с энергией дочерних короткоживущих продуктов распада [7]. Для получения анонсируемых результатов исследований применена нестандартная схема регистрации радона: спектроскопический радиометр фиксирует суммарную энергию дочерних короткоживущих продуктов бета-линий распада. С помощью «вшитого» в ПЗУ (постоянное запоминающее устройство) названного выше уравнения осуществляется расчет ОАР. Первичным измерителем радона является датчик цифрового анализатора радона *Canary Digital Radon Monitor* норвежской фирмы *Corentium*. Разработанная авторами статьи аппаратно-программная структура комплекса для долговременного непрерывного мониторинга ОАР представлена в работе [3]. Такой подход позволил решить задачу фильтрации влияния метеопараметров и других посторонних шумов на показания измерительного оборудования [8]. Запись результатов измерений радона производится с января 2016 г. непрерывно, ежечасно и автоматически.

Результаты исследований. Говоря о результатах спутникового мониторинга геодинамической активности тектонических плит, следует отметить, что многолетние непрерывные наблюдения позволяют достаточно точно зафиксировать:

- вектор средней скорости горизонтального перемещения локальных поверхностей,
- среднюю скорость и направление вертикальных подвижек,
- амплитудно-частотные характеристики колебаний поверхности в вертикальной плоскости относительно тренда.

На последний пункт следует обратить особое внимание. Как пример, многолетняя средняя вертикальная скорость (тренд) СГП Темрюк (рис. 3) равна – 7.73 мм/год. В то же время амплитуда колебаний земной поверхности относительно тренда достигает 20 мм. Период этих колебаний лежит в диапазоне 30–45 сут.

Ниже приведены результаты многолетнего мониторинга шести пунктов СГП (табл. 1, 2).

Подводя итог краткому обзору технологии спутниковых измерений геодинамической активности, можно сказать: метод позволяет оценить масштабы

Таблица 1. Многолетние средние скорости движения региональных СГП в системе *ITRF2008* (V_E , V_N – горизонтальные скорости движения СГП на восток и север соответственно; V_h – скорость вертикального движения)

Table 1. Long-term average speeds of movements of regional satellite geodynamic points (SGP) in the *ITRF2008* system (V_E , V_N are horizontal speeds of the SGP movement eastwards and northwards, respectively; V_h is the vertical speed)

СГП / SGP	Компоненты вектора скорости, мм/год / Components of velocity vector, mm/year			Вектор скорости, мм/год / Velocity vector, mm/year	Азимут, градусы / Azimuth, degrees
	V_E	V_N	V_h		
Геленджик / Gelendzhik	23.87 ± 0.20	10.94 ± 0.20	-1.84 ± 0.70	26.26 ± 0.30	+65.38
Анапа / Анапа	26.24 ± 0.20	16.74 ± 0.20	-4.75 ± 0.60	31.12 ± 0.30	+57.46
Тамань / Taman	28.72 ± 0.20	11.28 ± 0.20	$+12.11 \pm 0.60$	30.86 ± 0.20	+68.56
Темрюк / Temryuk	27.33 ± 0.20	11.73 ± 0.20	-7.73 ± 0.70	29.74 ± 0.30	+66.77
Чушка / Chushka	24.18 ± 0.20	12.16 ± 0.20	-2.28 ± 0.80	27.07 ± 0.20	+63.30

Таблица 2. Многолетние средние скорости движения региональных СГП относительно опорной станции в Карачаево-Черкесии

Table 2. Long-term average rates of regional SGPs movement relative to the reference station in Karachay-Cherkessia

СГП / SGP	Горизонтальные компоненты вектора скорости, мм/год / Horizontal components of velocity vector, mm/year		Вектор скорости, мм/год / Velocity vector, mm/year	Азимут, градусы / Azimuth, degrees
	V_E	V_N		
Геленджик / Gelendzhik	-1.50 ± 0.20	-0.72 ± 0.20	1.67 ± 0.30	-115.49
Анапа / Анапа	0.86 ± 0.20	5.08 ± 0.20	5.15 ± 0.30	+9.61
Тамань / Taman	3.34 ± 0.20	-0.38 ± 0.20	3.36 ± 0.20	+96.49
Темрюк / Temryuk	1.95 ± 0.20	0.07 ± 0.20	1.95 ± 0.20	+87.94
Чушка / Chushka	-1.20 ± 0.20	0.50 ± 0.20	1.30 ± 0.20	-67.38

протекающих процессов и тектоническую стабильность наблюдаемых территорий статистически. Для этих целей альтернативы ему нет.

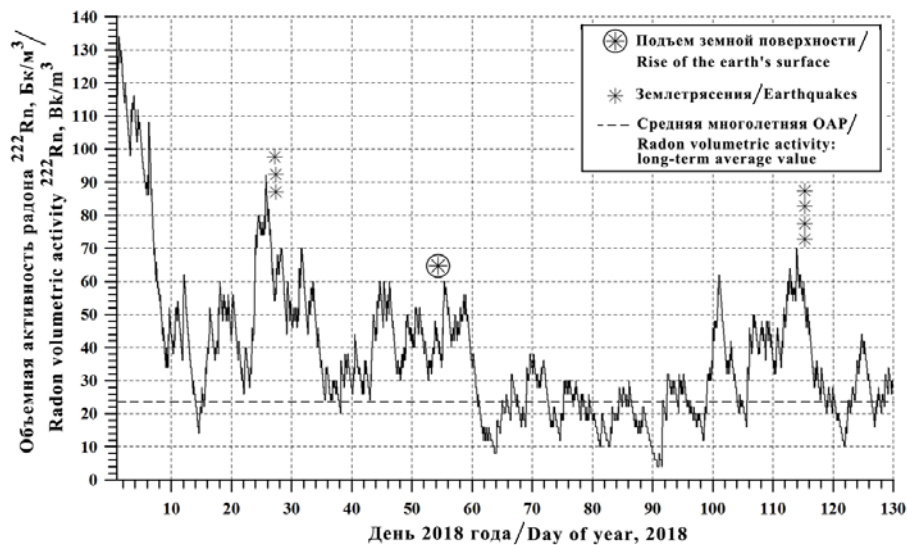
Задача мониторинга флуктуаций радона встает тогда, когда появляется необходимость прогнозировать место и время возникновения экстремальной ситуации. Факт, что концентрация радона в приземном воздухе является

ся индикатором сейсмической активности, известен давно. Первые измерения радона как предвестника землетрясений датированы 1927 г. Однако первая опубликованная запись, связывающая флуктуации радона с сейсмическими событиями, появилась лишь в 1966 г. после Ташкентского землетрясения. Именно это событие послужило толчком для развития направления науки, в котором радону отводилась роль индикатора-предвестника землетрясений. Во всем мире стали выполняться радоновые исследования, включающие дискретные и непрерывные измерения, измерения в почве, воде и воздухе [9]. Обзор методов и режимов измерений радона приведен в работе [10]. Чрезвычайная важность длительных непрерывных мониторинговых наблюдений за флуктуациями радона подчеркнута в [11, 12].

Пример вариации радона и произошедших за этот период землетрясений показан на рис. 3. Еще один пример связи критических аномалий радоновых флуктуаций с экстремальными событиями показан на рис. 4.

На рис. 4 представлен график флуктуаций радона за 130 дней 2018 г. На графике видно, что в начале января произошел выброс радона, в шесть раз превышающий среднее многолетнее значение. Через 53 дня (22 февраля 2018 г.) после этого произошло событие, аналогичное событию 2011 г.: территория вулкана Гнилая гора опустилась и вулкан взорвался. В это же время поверхность вулкана Азовское пекло поднялась примерно на 70 см. После пиков выброса радона 26 января и 24 апреля 2018 г. произошли три землетрясения в районе поселка Новомихайловка (диапазон магнитуд $M3.9-M4.0$) и четыре землетрясения в районе Анапы (диапазон магнитуд $M4.2-M4.5$).

Оба рисунка (рис. 3 и 4) иллюстрируют всего лишь связь критических аномалий радоновых флуктуаций с произошедшими в регионе экстремальными



Р и с . 4. График флуктуаций ОАР в приземной атмосфере с 1 января по 10 мая 2018 г. и экстремальные события, произошедшие за этот период

Fig. 4. Graph of radon volumetric activity fluctuations in the surface atmosphere during the period January 1 through May 10, 2018. Extreme events that occurred during this period are marked in the picture

событиями. Для определения места зарождающегося события необходимо проанализировать вторичные индикаторы-предвестники этого события. Вынос на поверхность радиоактивного радона приводит к активизации ряда процессов в атмосфере. Важнейший из них – формирование в ионосфере инфракрасного поля за счет убегающего длинноволнового инфракрасного излучения [6]. Тепловое пятно на уровне верхней кромки облаков (10–12 км) появляется за несколько дней до экстремальной ситуации. Пятно можно увидеть со специализированных спутников *NOAA* и с некоторой точностью определить область зарождающегося события.

Выводы

- Метод измерения ОАР по энергии дочерних короткоживущих продуктов бета-линий распада позволил исключить влияние метеопараметров и других посторонних шумов на показания датчика, фиксирующего вариации и реальные концентрации радона в приземной атмосфере.
- По полученным данным долговременного мониторинга радона осуществлена верификация некоторых прогностических моделей сейсмической активности [8].
- Анализ частотных характеристик флуктуаций радона позволил сделать предположение, что они отражают колебательные процессы тектонических структур в процессе геодинамической активности.
- Вынос на поверхность радиоактивного радона приводит к активизации процессов в атмосфере, ответственных за появление краткосрочных предвестников землетрясений. Но именно радон является первичным индикатором начала деформаций земной коры.
- Изменение ОАР в пять и более раз относительно среднего многолетнего значения говорит об активизации серьезных тектонических процессов на уровне структур 1-го порядка. Статистика наблюдений показывает, что через 50 ± 5 дней с момента проявления такой аномалии возможны экстремальные ситуации в регионе исследований.
- Превышение выбросов радона в три и более раза относительно среднего многолетнего значения может вызвать землетрясения в регионе. Выбросам радона предшествует процесс сжатия тектонических структур в разломах. Сжатие продолжается до тех пор, пока не будет превышен предел длительной прочности пород, характерный для каждой местности.
- Технологии спутниковых измерений тектонической активности позволяют оценить масштабы протекающих процессов статистически. Мгновенная же оценка возникающих деформаций земной коры возможна только посредством мониторинга вариаций радона в приземной атмосфере.
- При появлении аномальных выбросов радона для фиксирования места возможного проявления экстремальной сейсмической ситуации следует тщательно отслеживать динамику тепловых полей на картах со спутников *NOAA*. Статистика наблюдений показывает, что землетрясение происходит через 18–30 ч после пика выброса радона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Характер движений поверхности земной коры по данным GPS-измерений в районе Азово-Черноморского побережья Российской Федерации / В. А. Бабешко [и др.] // Наука Юга России. 2016. Т. 12, № 4. С. 33–40.
2. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации : Пояснительная записка к комплекту карт ОСП-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах / Сост. В. И. Уломов [и др.] ; гл. ред. В. И. Уломов, М. И. Богданов // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121. URL: http://seismos-u.ifz.ru/documents/_zapiska_OSP_2016.pdf (дата обращения: 28.02.2020).
3. Подымов И. С., Подымова Т. М. Некоторые результаты долговременного мониторинга объемной активности радона в приземной атмосфере северо-восточного сектора Черного моря // Современные исследования в сфере естественных, технических и физико-математических наук. Киров : Изд-во МЦИТО, 2018. С. 243–256.
4. Altamimi Z., Métivier L., Collilieux X. ITRF2008 plate motion model // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2012. Vol. 117, iss. B7. B07402. <https://doi.org/10.1029/2011JB008930>
5. Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame // Journal of Geodesy. 2011. Vol. 85, iss. 8. P. 457–473. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>
6. Пулинец С. А., Узун Д. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф // Труды Института прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова. М. : ИПГ, 2011. Вып. 89. С. 173–185. URL: <http://vestnik.geospace.ru/magazines/89/89.pdf> (дата обращения: 20.01.2010).
7. Подымов И. С., Подымова Т. М. Экспресс-метод исследований объемной активности радона над земной поверхностью // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Вып. 2. С. 19–22.
8. Подымов И. С., Подымова Т. М. Верификации прогностических моделей сейсмической активности по данным долговременного мониторинга вариаций радона и базе землетрясений, произошедших за период мониторинга // Труды Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития». К 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, доктора физико-математических наук, профессора Льва Николаевича Карлина. СПб. : Аграф+, 2017. С. 389–393.
9. Riggio A., Santulin M. Earthquake forecasting: a review of radon as seismic precursor // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 2015. Vol. 56, no. 2. P. 95–114. doi:10.4430/bgta0148
10. Papastefanou C. Measuring radon in soil gas and groundwaters: a review // Annals of Geophysics. 2007. Vol. 50, no. 4. P. 569–578. <https://doi.org/10.4401/ag-3070>
11. Friedmann H. Radon in earthquake prediction research // Radiation Protection Dosimetry. 2012. Vol. 149, iss. 2. P. 177–184. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr229>
12. Immè G., Morelli D. Radon as earthquake precursor // Earthquake research and analysis – statistical studies, observations and planning / Dr S. D'Amico (Ed.). Rijeka : InTech Europe, 2012. P. 143–160. doi:10.5772/29917

Об авторах:

Подымов Игорь Семенович, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (353467, Россия, Геленджик, Просторная, 1Г), кандидат технических наук, **ORCID ID: 0000-0003-3138-0811**, **ResearcherID: Q-9212-2016**, **Scopus Author ID: 6505948782**, *ipodymov@inbox.ru*

Подымова Татьяна Михайловна, научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (353467, Россия, Геленджик, Просторная, 1Г), **ORCID ID: 0000-0003-2185-9984**, **ResearcherID: AAG-7984-2020**, **Scopus Author ID: 54783340700**, *tpodymova@inbox.ru*

Есин Николай Васильевич, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (353467, Россия, Геленджик, Просторная, 1Г), доктор географических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6434-5938**, **ResearcherID: F-8360-2017**, **Scopus Author ID: 57201578327**, *ovos_oos@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Подымов Игорь Семенович – разработка оборудования и программного обеспечения, обработка и анализ данных, написание черновика статьи

Подымова Татьяна Михайловна – анализ данных, подготовка обзора литературы, коррекция текста статьи

Есин Николай Васильевич – подготовка обзора литературы, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Babeshko, V.A., Shestopalov, V.L., Yubko, V.M. and Glazyrin, E.A., 2016. Description of Crust Movements According to GPS Measurements in the Azov-Black Sea Coast Area of the Russian Federation. *Science in the South of Russia*, 12(4), pp. 33–40 (in Russian).
2. Ulomov, V.I. and Bogdanov, M.I., eds., 2016. Explanatory Note on the GSZ-2016 Maps Set of General Seismic Zoning of the Russian Federation Territory. *Engineering Survey*, (7), pp. 49–121. Available at: http://seismosu.ifz.ru/documents/_zapiska_OCP_2016.pdf [Accessed: 28 February 2020] (in Russian).
3. Podymov, I.S. and Podymova, T.M., 2018. [Some Results of Radon Volume Activity Long-Time Monitoring in the Surface Atmosphere of the Black Sea Northeastern Sector]. In: МЦИТО, 2018. [*Modern Investigations in the Field of Natural, Technical, Physical and Mathematical Sciences*]. Kirov: МЦИТО, pp. 243–256 (in Russian).
4. Altamimi, Z., Métivier, L. and Collilieux, X., 2012. ITRF2008 Plate Motion Model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7), B07402. <https://doi.org/10.1029/2011JB008930>
5. Altamimi, Z., Collilieux, X. and Métivier, L., 2011. ITRF2008: an Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), pp. 457–473. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>
6. Pulinets, S. and Ouzounov, D., 2011. [There is no Alternative to Satellite Technologies. On the Problem of Monitoring Natural and Man-Made Disasters]. In: IPG, 2011. *Trudy IPG* [Proceedings of Institute of Applied Geophysics]. Moscow: IPG, 2011. Iss. 89, pp. 173–185. Available at: <http://vestnik.geospace.ru/magazines/89/89.pdf> [Accessed: 20 January 2010] (in Russian).

7. Podymov, I.S. and Podymova, T.M., 2016. Rapid Method for Investigations of Radon Volume Activity above the Earth's Surface. In: MHI, 2016. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. Sevastopol: MHI. Iss. 2, pp. 19–22.
8. Podymov, I.S. and Podymova, T.M., 2017. Verification of Predictive Models of Seismic Activity, According to Long-Term Monitoring of Radon Variations and of Earthquakes Database that Have Occurred over the Monitoring Period. In: P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, 2017. *Proceedings of the Russian National Conference "Hydrometeorology and Ecology: Scientific and Educational Achievements and Perspectives" to the 70th Anniversary of the Birth of Lev N. Karlin*. St. Petersburg: AGRAF+, pp. 389–393 (in Russian).
9. Riggio, A. and Santulin, M., 2015. Earthquake Forecasting: a Review of Radon as Seismic Precursor. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 56(2), pp. 95–114. doi:10.4430/bgta0148
10. Papastefanou, C., 2007. Measuring Radon in Soil Gas and Groundwaters: a Review. *Annals of Geophysics*, 50(4), pp. 569–578. <https://doi.org/10.4401/ag-3070>
11. Friedmann, H., 2012. Radon in Earthquake Prediction Research. *Radiation Protection Dosimetry*, 149(2), pp. 177–184. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr229>
12. Immè, G. and Morelli, D., 2012. Radon as Earthquake Precursor. In: Dr. S. D'Amico, ed., 2012. *Earthquake Research and Analysis – Statistical Studies, Observations and Planning*. Rijeka: InTech Europe, pp. 143–160. doi:10.5772/29917

About the authors:

Igor S. Podymov, Senior Researcher, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS (1G Prostornaya St., Gelendzhik, 353467, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), **ORCID ID: 0000-0003-3138-0811**, **ResearcherID: Q-9212-2016**, **Scopus Author ID: 6505948782**, ipodymov@inbox.ru

Tatiana M. Podymova, Scientific Researcher, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS (1G Prostornaya St., Gelendzhik, 353467, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-2185-9984**, **ResearcherID: AAG-7984-2020**, **Scopus Author ID: 54783340700**, tpodymova@inbox.ru

Nicolay V. Esin, Head Researcher, P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS (1G Prostornaya St., Gelendzhik, 353467, Russian Federation), Dr.Sci. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0001-6434-5938**, **ResearcherID: F-8360-2017**, **Scopus Author ID: 57201578327**, ovos_oos@mail.ru

Contribution of the authors:

Igor S. Podymov – development of hardware and software, data processing and analysis, composition of the article draft

Tatiana M. Podymova – data analysis, preparation of literature review, article text correction

Nicolay V. Esin – preparation of literature review, article text correction

All the authors have read and approved the final manuscript.