

Инфракрасное излучение тепловых аномалий и аномалии вариаций радона, предшествующие двум землетрясениям в Азовском и Черном морях

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

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Геленджик, Россия*

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

Поступила 16.01.2020 г.; принята к публикации 08.05.2020 г.; опубликована 25.06.2020 г.

В работе представлен фрагмент современных исследований геофизических процессов в прибрежной зоне Российского сектора Черного и Азовского морей (Краснодарский край, Керченский п-ов). По материалам экспериментальных исследований динамики радона в приземной атмосфере до и после землетрясений в Азовском море (15 октября 2018 г.) и в окрестностях Анапы (15 июля 2019 г.) выявлены ранее неизвестные параметры флуктуаций радона в течение 38 сут до землетрясений. В некоторых случаях они могут быть использованы для краткосрочного прогноза назревающих сейсмических событий. Цель работы – поиск закономерностей формирования индикаторов начала деформаций земной коры в регионе и разработка методов краткосрочных прогнозов экстремальных сейсмических событий. Методы исследований: долговременный мониторинг вариаций радона в приземной атмосфере, сопоставление вариаций радона с произошедшими (по базе данных Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра) землетрясениями, анализ тепловых и инфракрасных полей в атмосфере и ионосфере по спутниковым снимкам, полевые исследования, математическое моделирование. На основании результатов проведенных исследований, а также аналогичных исследований в других точках земного шара подтверждены ключевые индикаторы-предвестники сейсмических событий. Зафиксирована последовательность их проявлений на временном интервале. Показано, что аномальные выбросы радона – самый ранний индикатор начала деформаций земной коры, между их появлением и проявлением экстремальной ситуации есть определенный промежуток времени. Представленная в работе схема мониторинговых наблюдений и последовательность действий при аномально высокой эманации радона имеют практическую значимость для регионов со сложной геологической структурой и значимыми объектами инфраструктуры.

Ключевые слова: Азово-Черноморское побережье, объемная активность радона, уходящее длинноволновое инфракрасное излучение, тепловые аномалии, предвестники землетрясений, прогноз экстремальных ситуаций.

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».

© 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

Для цитирования: Подымов И. С., Подымова Т. М., Есин Н. В. Инфракрасное излучение тепловых аномалий и аномалии вариаций радона, предшествующие двум землетрясениям в Азовском и Черном морях // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 41–52. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-41-52

Infrared Radiation of Thermal Anomalies and Radon Fluctuation Anomalies Preceding Two Earthquakes in the Sea of Azov and the Black Sea

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

Shirshov Institute of Oceanology RAS, Gelendzhik, Russia
*e-mail: ipodymov@inbox.ru

Submitted 10.01.2020; revised 08.05.2020; published 25.06.2020

This paper presents a fragment of modern research for geophysical processes in the coastal zone of the Russian sector of the Black and Azov Seas (Krasnodar Territory, Kerch Peninsula). Based on the data of experimental studies of radon dynamics in the surface atmosphere before and after earthquakes in the Sea of Azov (October 15, 2018) and near Anapa (July 15, 2019), previously unknown parameters are revealed of radon fluctuations during the period of 38 days before the earthquakes. In certain cases, they can be used for short-term prediction of incipient seismic events. The purpose of this work is to search for formation patterns of indicators of beginning of crustal deformations in the region under study and to attempt to develop methods for short-term forecasts of extreme seismic events. Research methods: long-term monitoring of radon variations in the surface atmosphere, matching of radon variations and occurred earthquakes (according to the database of the European-Mediterranean Seismological Center), analysis of thermal and infrared fields in the atmosphere and ionosphere by satellite images, field research, mathematical modeling. Based on the results of conducted research as well as similar studies in other parts of the world, the key indicators-precursors of seismic events have been confirmed. The sequence of their manifestations has been fixed over a time span. It is shown that abnormal radon emissions are the earliest indicators of beginning of crustal deformations. There is a certain period between their manifestation and occurrence of an extreme seismic event. The monitoring observation scheme and sequence of actions to take during abnormally high radon emanation, which are presented in the paper, are of practical significance for regions with a complex geological structure and important infrastructure facilities.

Keywords: Azov-Black seacoasts, radon volumetric activity, outgoing long-wave infrared radiation, thermal anomalies, earthquake precursors, 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 Hydrophysical, Hydrochemical, Biological, Coastal and Lithodynamic Processes”.

For citation: Podymov, I.S., Podymova, T.M. and Esin, N.V., 2020. Infrared Radiation of Thermal Anomalies and Radon Fluctuation Anomalies Preceding Two Earthquakes in the Sea of Azov and the Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 41–52. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-41-52 (in Russian).

Введение

Начало исследованиям стабильности береговых геосистем Черного и Азовского морей было положено в 2011 г. после неординарных деформаций земной поверхности в Таманском регионе [1]. Экспедиционные наблюдения того времени позволили зафиксировать разнонаправленные деформации земной поверхности на всей территории Таманского п-ова. Земная поверхность в районе пос. Приазовского поднялась на 5 м, в районе г. Темрюка опустилась на 2 м. Выбросы радона над поверхностью Радонового озера (м. Каменный) превысили предельно допустимую концентрацию в сотни раз. Некоторые результаты лабораторно-полевых исследований 2011–2013 гг. приведены на интернет-ресурсах (URL: <https://mud-volcano.coastdyn.ru/anomalous%20motion.html>). Исследования тех лет поставили задачу поиска индикаторов деформации земной коры и методов прогноза экстремальных сейсмических событий.

Объект исследования – прибрежная зона Российского сектора Черного и Азовского морей (Краснодарский край, Крымский п-ов).

Цель работы – найти закономерность формирования индикаторов деформаций земной коры и разработать метод краткосрочного прогноза экстремальных сейсмических событий.

Методы исследований: долговременный мониторинг вариаций радона в приземной атмосфере, сопоставление вариаций радона с произошедшими землетрясениями по базе данных Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (ЕССЦ), анализ тепловых и инфракрасных полей в атмосфере и ионосфере по спутниковым снимкам, полевые исследования, математическое моделирование.

Практическая значимость исследований обусловлена высокой плотностью населения и наличием значимых объектов инфраструктуры в регионе.

Обзор решений поставленной задачи

Поиск предвестников экстремальных сейсмических событий ведется с середины XX в. В разное время проводились мониторинговые исследования физических процессов в толще земной коры, в атмосфере, ионосфере и т. п. Оценивались вариации различных физических параметров в период сейсмической стабильности, в процессе подготовки землетрясений, во время землетрясений и после них. Этапы развития исследований можно проследить по публикациям их результатов. Появились обобщающие работы [2, 3] по прогнозу землетрясений на основе накопленных и обработанных первичных данных об электромагнитных и атмосферных явлениях. В то же время некоторые авторы полностью отрицали возможность краткосрочного прогноза сейсмических аномалий [4, 5]. При появлении спутниковых технологий стали разрабатываться новые концепции и модели прогноза [6, 7]. Однако до настоящего времени процессы в атмосфере и ионосфере, электромагнитные явления, предшествующие землетрясениям, остаются предметом острых дискуссий.

Анализ результатов комплексных наблюдений показал, что предшествующие землетрясениям процессы в атмосфере и ионосфере связаны между собой [8], а для поиска закономерностей их взаимозависимости нужны фундаментальные исследования кинетики ионов в атмосфере [9, 10]. Исследо-

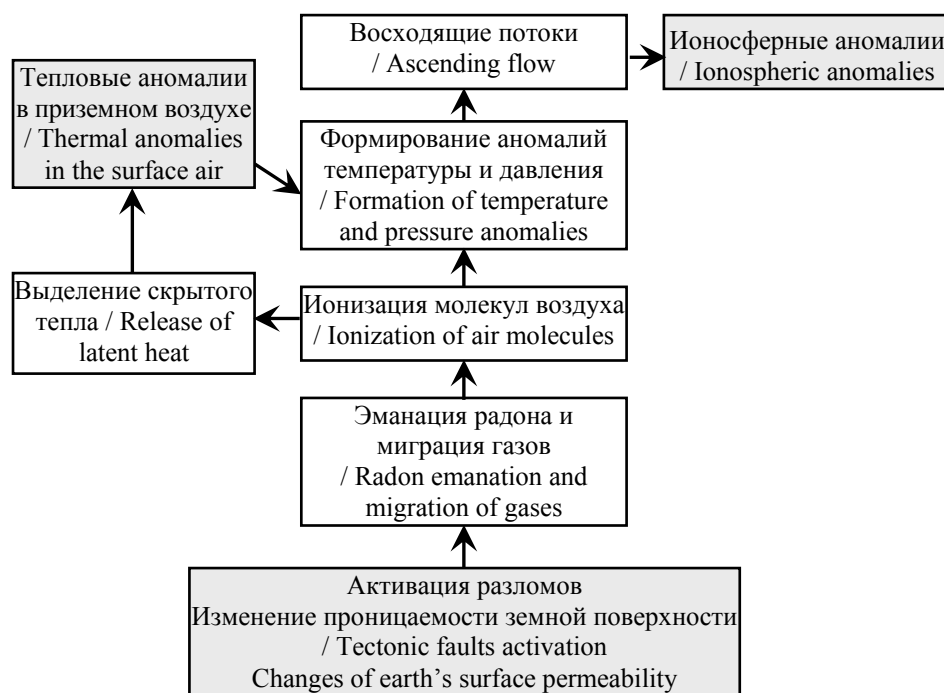
вания на протяжении двух десятилетий XX в. показали, что только многопараметрический подход к изучению краткосрочных предвестников землетрясений позволит достигнуть желаемых результатов в решении поставленной задачи.

Не будем детально анализировать современную модель формирования всех предвестников землетрясений. Она достаточно подробно представлена в работе [11]. Схематично рассмотрим упрощенную последовательность формирования трех основных краткосрочных предвестников землетрясений.

Сейсмический цикл можно представить как цепную реакцию. Деформации земной коры порождают строгую последовательность производных процессов и аномалий. В зависимости от тектонических особенностей региона и рассматриваемой магнитуды землетрясения сейсмический цикл между двумя землетрясениями в одной и той же точке занимает промежуток от нескольких лет до нескольких десятков или даже сотен лет. Например, для землетрясений с магнитудой $M8$ в Крымско-Таманском регионе этот цикл составляет 500 лет. Другими словами, вероятность появления такого события в течение 50 лет составляет 10 % [12]. Процессы и аномалии внутри сейсмического цикла происходят с некоторой периодичностью. Их условно делят на долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные предвестники землетрясений [13]. Однако четкого критерия момента перехода предвестников от среднесрочных к краткосрочным не существует. Принято считать, что переход осуществляется тогда, когда динамика процессов в тектонической структуре проходит точку невозврата, т. е. землетрясение случится, невзирая ни на какие обстоятельства.

Процесс того, что происходит на последней стадии подготовки землетрясения, подробно описан в [14, с. 58]. Возникающие при этом обширные деформации земной поверхности приводят к активации разломов и изменению проницаемости земной коры, что, в свою очередь, ведет к увеличению миграции газов и эманации радона из недр. Феномен проявления радоновых аномалий в каждом конкретном регионе связан с особенностями сейсмогеологических условий и строением литосферы. Наиболее эффективно такие аномалии фиксируются в зонах сейсмоактивных разломов. Если говорить о вариациях радона при появлении сейсмической нестабильности, то они принципиально важны для реализации всей цепи генерируемых краткосрочных предвестников землетрясений. Схема формирования трех основных краткосрочных предвестников землетрясений показана на рис. 1. Рисунок представляет собой упрощенную схему комплексной модели связей в системе литосфера – атмосфера – ионосфера, представленной на рис. 4 в работе [6, с. 177].

Увеличенная эманация радона запускает цепь физических процессов, одним из которых является повышение температуры приповерхностного слоя воздуха над активными тектоническими разломами. Комплексные исследования 2003 г. [8] показали, что при подготовке землетрясения тепло выделяется непосредственно в атмосфере в виде скрытой теплоты испарения. Центрами конденсации для влаги становятся ионы, образуемые в результате ионизации атмосферных газов альфа-частицами радона, выделяемого из земной коры перед землетрясением. Механизм формирования тепловых аномалий в атмосфере (от момента ионизации молекул воздуха до выделения скрытой теплоты испарения на ионах) подробно рассмотрен в [15].



Р и с . 1. Блок-схема формирования трех основных краткосрочных предвестников землетрясений

F i g . 1. Block diagram of formation of three main short-term earthquake precursors

Тепловые аномалии вблизи поверхности проявляются в виде линейных структур, вытянутых вдоль активных разломов. Горизонтальные градиенты температуры и давления приводят к процессу перемешивания и образованию вертикального восходящего потока над областью подготовки землетрясения. Разномасштабные турбулентные процессы приводят к образованию крупномасштабной структуры – теплового инфракрасного пятна *OLR* (англ. *Outgoing Long-wave Radiation* – убегающее длинноволновое инфракрасное излучение) в ионосфере на уровне 10–12 км от поверхности земли [11, 16]. Интенсивность поля инфракрасного излучения зависит от выделяемой тепловой энергии, т. е. от масштаба зарождающегося сейсмического события. Энергетическая эффективность процесса приводит к вариациям параметров атмосферы, регистрируемым как наземной аппаратурой, так и методами дистанционного зондирования со спутников [17].

Источники информации и методы регистрации первичных данных, реализованные в рамках исследований

Мониторинг объемной активности радона (ОАР) ведется в Южном отделении Института океанологии РАН (ЮО ИО РАН), где спроектирован и внедрен в эксплуатацию измерительный комплекс регистрации флуктуаций ОАР. Разработанная аппаратно-программная структура комплекса для долговременного непрерывного мониторинга ОАР представлена в [18]. Первичным измерителем радона является спектроскопический датчик цифрового анализатора *Radon Monitor Canary Pro* норвежской фирмы *Corentium*.

Измерительно-регистрирующий комплекс установлен в границах активного Маркхотского разлома. Запись результатов измерений радона производится с января 2016 г. непрерывно, ежечасно и автоматически. В настоящее время в распоряжении ЮО ИО РАН имеются непрерывные ряды флуктуаций ОАР в приземной атмосфере за четыре года наблюдений (с 2016 по 2019 г.).

Онлайн-мониторинг землетрясений за последние двое суток можно осуществить с помощью Системы мониторинга за состоянием окружающей среды (URL: <https://idp-cs.net/ym.php?sz=2&sc=65.98>).

Полную информацию о землетрясениях, происходящих и произошедших с 2004 по 2020 гг. предоставляет ЕССЦ (URL: <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/>).

Фиксация тепловых аномалий в приземном воздухе осуществляется со спутника *Modis-Terra*.

Фиксация ионосферных аномалий выполняется со спутника *Aster-Terra*.

Динамические карты тепловых аномалий от земной поверхности до ионосферы представлены на сайтах спутников *Sat24* (URL: <https://en.sat24.com/en/eu/km>) и *NOAA* (URL: <http://hobitus.com/noaa/composite/hvct-precip/>). При просмотре тепловых карт существует возможность отключения источников света видимого спектра.

Обсуждение результатов

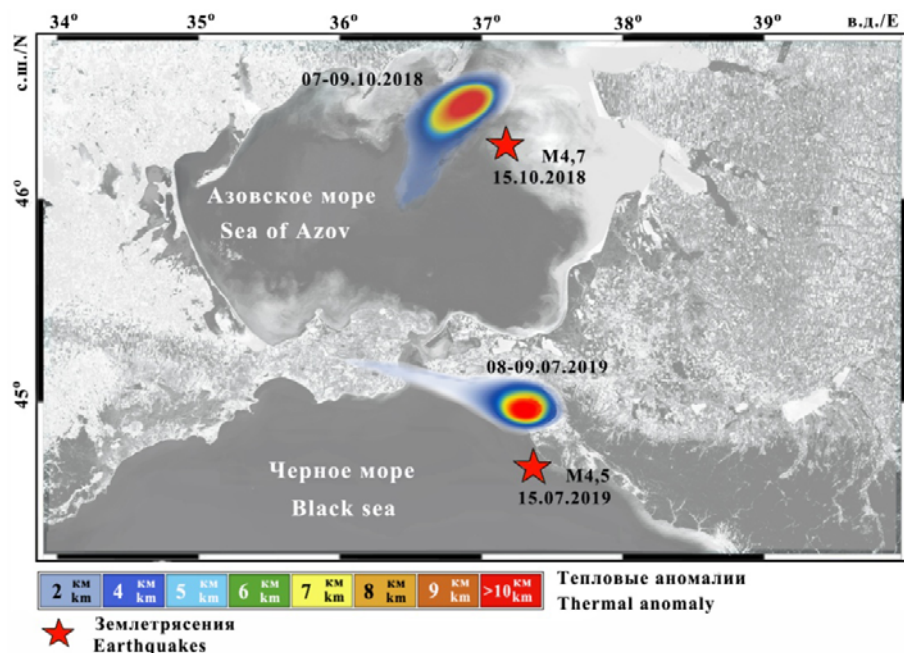
15 октября 2018 г. произошло землетрясение в Азовском море, самое сильное за последние 30 лет, а 15 июля 2019 г. – в Черном море, с эпицентром в 23 км от г. Анапы. Магнитуды землетрясений были *M4.7* и *M4.5* соответственно. Информация о землетрясениях приведена в таблице.

На рис. 2 показана карта региона землетрясений, их эпицентры и зоны проявления тепловых аномалий в приземной атмосфере. Тепловые аномалии в сглаженном виде перенесены на карту региона исследований со спутниковых карт.

Тепловые аномалии приземного слоя не точно совпадают с местом землетрясений. Это связано с тем, что область формирования тепловой аномалии сконцентрирована над тектонической структурой растяжения, где происходит увеличение масштаба активного разлома. Структура сжатия, где может произойти землетрясение, находится от этого места на некотором расстоянии, характерном для геологического строения региона. Сформированное в ионосфере инфракрасное поле размывается горизонтальными струйными потоками при удалении от центра аномалии. Именно поэтому важно анализировать спутниковую карту в динамике. Такую возможность предоставляют некоторые спутники *NOAA*. По динамической карте четко видно,

Данные о землетрясениях, произошедших в Азовском и Черном морях в 2018 и 2019 гг.
Data on earthquakes that occurred in the Azov and Black Seas in 2018 and 2019

Дата / Date	Широта, ° с. ш. / Latitude, N	Долгота, ° в. д. / Longitude, E	Глубина, км / Depth, km	Магнитуда / Magnitude	Энергия, Дж / Energy, J
15.10.2018	46°19'12"	37°11'24"	10	4.7	$7.08 \cdot 10^{11}$
15.07.2019	44°39'36"	37°17'00"	40	4.5	$3.55 \cdot 10^{11}$



Р и с . 2. Землетрясения в Азовском и Черном морях: эпицентры землетрясений и положение предшествующих им тепловых аномалий

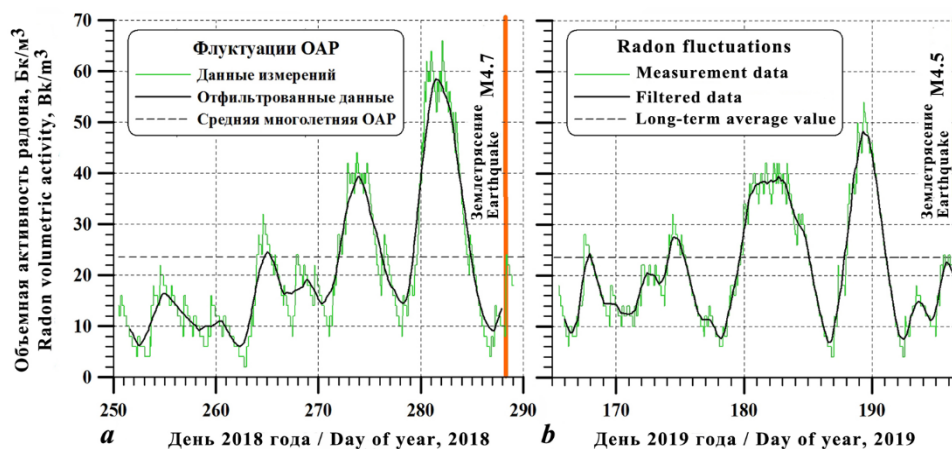
Fig . 2. Earthquakes in the Azov and Black Seas: earthquakes epicenters and location of thermal anomalies that precede them

где тепловая аномалия зарождается и куда перемещается. Проекция центра (начала) тепловой аномалии на земную поверхность редко удаляется от места будущего землетрясения более чем на несколько десятков километров. Здесь следует отметить, что процесс подготовки землетрясения захватывает область с радиусом поверхности $R = 10^{0.43M}$, где M – магнитуда зарождающегося события [13]. То есть землетрясение магнитудой $M5$ в процессе подготовки захватывает земную поверхность диаметром около 300 км.

На рис. 3 приведены графики флуктуаций радона ^{222}Rn в приземной атмосфере перед землетрясениями в Азовском и Черном морях.

Графики флуктуаций ОАР иллюстрируют периодичность амплитуды колебаний. Здесь представлены два разных землетрясения. Расстояние между эпицентрами рассмотренных землетрясений около 200 км, но характер вариаций ОАР на обоих графиках почти идентичен. Период колебаний с нарастающей амплитудой равен примерно 9 сут. Оба процесса похожи на зарождение резонансных колебаний земной коры большого масштаба, финалом которых стал срыв крыльев сейсмогенного разлома. Радонные аномалии начали развиваться примерно за 35–40 сут до землетрясения. Максимальный выброс радона, после которого произошло землетрясение, существенно превысил многолетний средний фон. Землетрясения произошли через 6–7 дней после пика выброса радона.

В работе [19] на примере трех землетрясений рассмотрено изменение параметров внутренних гравитационных волн (ВГВ) перед землетрясениями. Из табл. 1, 3 [19, с. 302] видно, что длина волны ВГВ меняется за пять –



Р и с . 3. Графики флуктуаций ОАР в приземной атмосфере: *a* – за 38 дней до землетрясения в Азовском море; *b* – за 32 дня до землетрясения в Черном море

Fig. 3. Charts of radon volumetric activity fluctuations in the surface atmosphere: *a* – 38 days before the earthquake in the Sea of Azov; *b* – 32 days before the earthquake in the Black Sea

шесть дней до сейсмокатастрофы. В комментарии к статье (Ученые обнаружили новые признаки надвигающихся землетрясений // Sputnik Таджикистан. 23.10.2019. URL: <https://sptnkne.ws/CBpD>) поясняется, что: «...ВГВ – это колебания воздушных масс, имеющих, в отличие от звуковых волн, помимо продольной, еще и поперечную составляющую...». Здесь же сказано, что для выявления параметров ВГВ использованы данные спутниковых измерений, доступные на ресурсе *NASA Giovanni*.

Сравнение частотных характеристик ВГВ и вариаций ОАР в преддверии сейсмических событий показало их значительное совпадение. Поскольку количество выбрасываемого радона связано с деформациями земной коры, можно сказать, что графики на рис. 3 отражают не только колебания ОАР в атмосфере, но и колебания земной коры. Естественно, колебания тектонических структур вызывают колебания воздушных масс. Отсюда появилось предположение, что отслеживать ВГВ можно не только со спутников, оборудованных специальными техническими средствами.

Выводы

– На основании результатов проведенного мониторинга ОАР, а также результатов аналогичных исследований в других точках земного шара можно подтвердить следующие положения: ключевыми индикаторами-предвестниками сейсмических событий являются:

- 1) аномальные вариации радона,
- 2) тепловые аномалии *OLR*,
- 3) ионосферные аномалии.

Появляются они в перечисленной последовательности с определенной задержкой во времени.

– Частотные характеристики происходящих событий имеют отличительные черты для каждого региона и для конкретной магнитуды землетрясения.

Чтобы их оценить, нужна статистика длительных мониторинговых наблюдений.

– Вариации радона в приземной атмосфере необходимо непрерывно контролировать наземными измерительно-регистрирующими комплексами. Организация таких измерений не представляет особой сложности. Важно осознавать, что аномальные выбросы радона – первый индикатор начала деформаций земной коры, между этими выбросами и проявлением экстремальной ситуации есть определенный промежуток времени.

– При появлении резких выбросов радона необходимо приступить к отслеживанию тепловых и ионосферных аномалий, которые с высокой точностью и достоверностью укажут на место зарождающегося землетрясения.

– Эту последовательность наблюдений и действий (при аномально высокой эманации радона) чрезвычайно важно соблюдать в регионах со сложным геологическим строением.

– Исследования, идентифицирующие частотные параметры вариаций ОАР и ВГВ, необходимо продолжить. Статистика наблюдений поможет повысить корректность прогноза зарождающегося сейсмического события.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Podymov I., Podymova T.* Anomalous Natural Phenomenon at the Coastal Zone of Azov Sea // Proceedings of the Global Congress on ICM: Lessons Learned to Address New Challenges EMECS 10 – Medcoast 2013 Joint Conference (30 Oct. – 03 Nov., Marmaris, Turkey). Ankara, Turkey, 2013. Vol. 1. P. 655–664. doi:10.13140/RG.2.1.4520.1447
2. *Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А.* Сейсмоэлектромагнитные явления. М. : Наука, 1988. 169 с.
3. *Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л.* Ионосферные предвестники землетрясений. М. : Наука, 1992. 303 с.
4. Earthquakes cannot be predicted / R. J. Geller [et al.] // Science. 1997. Vol. 275, iss. 5306. P. 1616–1618. doi:10.1126/science.275.5306.1616
5. *Тертышников А. В.* Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. СПб. : ВИКА, 2000. 304 с.
6. *Пулинец С. А., Узунов 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: 20.05.2010).
7. *Pulinets S., Ouzounov D.* Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation // Journal of Asian Earth Sciences. 2011. Vol. 41, iss. 4–5. P. 371–382. doi:10.1016/j.jseaes.2010.03.005
8. Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of the Colima M7.8 earthquake of 21 January 2003 / S. A. Pulinets [et al.] // Annales Geophysicae. 2006. Vol. 24, iss. 3. P. 835–849. doi:10.5194/angeo-24-835-2006
9. *Боярчук К. А., Карелин А. В., Широков Р. В.* Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. М. : НПП ВНИИЭМ, 2006. 203 с.
10. Единая концепция обнаружения признаков подготовки сильного землетрясения в комплексной системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера / С. А. Пулинец [и др.] // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 6. С. 81–90.

11. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, инициируемых ионизацией / С. А. Пулинец [и др.] // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55, № 4. С. 540–558. doi:10.7868/S0016794015040136
12. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации : Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-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_OCR_2016.pdf (дата обращения: 20.05.2020).
13. Добровольский И. П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М. : Физматлит, 2009. 235 с.
14. Подымов И. С., Подымова Т. М. Мониторинг состояния гидрогеодеформационного поля по плотности потока радона из грунта // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2016. Вып. 1. С. 56–62.
15. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions / H. Svensmark [et al.] // Proceedings of the Royal Society A. 2007. Vol. 463, iss. 2078. P. 385–396. doi:10.1098/rspa.2006.1773
16. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes / D. Ouzounov [et al.] // Tectonophysics. 2007. Vol. 431, iss. 1–4. P. 211–220.
17. Ковалева С. К. Радон как предвестник землетрясения // История науки и техники. 2015. № 12. С. 81–85.
18. 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 : АНО ДПО МЦИТО, 2018. С. 243–256.
19. Об изменениях параметров внутренних гравитационных волн в атмосфере Центральной Азии перед землетрясениями / В. В. Адушкин [и др.] // Доклады Академии наук. 2019. Т. 487, № 3. С. 299–303. doi:10.31857/S0869-56524873299-303

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 – сбор, обработка и анализ первичных данных, написание черновика статьи

Подымова Татьяна Михайловна – анализ данных, коррекция текста статьи

Есин Николай Васильевич – анализ данных, коррекция текста статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Podymov, I. and Podymova, T., 2013. Anomalous Natural Phenomenon at the Coastal Zone of Azov Sea. In: E. Özhan, ed., 2013. *Proceedings of the Global Congress on ICM: Lessons Learned to Address New Challenges EMECS 10 – Medcoast 2013 Joint Conference (30 Oct. – 03 Nov., Marmaris, Turkey)*. Ankara, Turkey, 2013. Vol. 1, pp. 655–664. doi:10.13140/RG.2.1.4520.1447
2. Gokhberg, M.B., Morgunov, V.A. and Pokhotelov, O.A., 1988. [*Seismoelectromagnetic Phenomena*]. Moscow: Nauka, 169 p. (in Russian).
3. Liperovsky, V.A., Pokhotelov, O.A. and Shalimov, S.L., 1992. [*Ionospheric Precursors of Earthquakes*]. Moscow: Nauka, 303 p. (in Russian).
4. Geller, R.J., Jackson, D.D., Kagan, Y.Y. and Mulargia, F., 1997. Earthquakes Cannot Be Predicted. *Science*, 275(5306), pp. 1616–1618. doi:10.1126/science.275.5306.1616
5. Tertyshnikov, A.V., 2000. [*Seismic Ozone Effects and the Problems of Earthquake Forecasting*]. Saint Petersburg: VIKA, 304 p. (in Russian).
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 (in Russian).
7. Pulinets, S. and Ouzounov, D., 2011. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) Model – An Unified Concept for Earthquake Precursors Validation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(4–5), pp. 371–382. doi:10.1016/j.jseae.2010.03.005
8. Pulinets, S.A., Ouzounov, D., Ciralo, L., Singh, R., Cervone, G., Leyva, A., Dunajevka, M., Karelin, A.V., Boyarchuk, K.A. and Kotsarenko, A., 2006. Thermal, Atmospheric and Ionospheric Anomalies around the Time of the Colima M7.8 Earthquake of 21 January 2003. *Annales Geophysicae*, 24(3), pp. 835–849. doi:10.5194/angeo-24-835-2006
9. Boyarchuk, K.A., Karelin, A.V. and Shirokov, R.V., 2006. [*The Base Model of the Ionized Atmosphere Kinetics*]. Moscow: IPG VNII EM, 203 p. (in Russian).
10. Pulinets, S.A., Ouzounov, D.P., Karelin, A.V., Boyarchuk, K.A., Tertyshnikov, A.V. and Yudin, I.A., 2013. Single Concept of Signs of Preparation of Strong Earthquakes in the Complex System Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere. *Heliogeophysical Research*, 6, pp. 81–90 (in Russian).
11. Pulinets, S.A., Ouzounov, D.P., Karelin, A.V. and Davidenko, D.V., 2015. Physical Bases of the Generation of Short-Term Earthquake Precursors: A Complex Model of Ionization-Induced Geophysical Processes in the Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere System. *Geomagnetism and Aeronomy*, 55(4), pp. 521–538. doi:10.7868/S0016794015040136
12. 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).
13. Dobrovolsky, I.P., 2009. *Mathematical Theory of Preparation and Forecast of Tectonic Earthquakes*. Moscow: Fizmatlit, 235 p. (in Russian).

14. Podymov, I.S. and Podymova, T.M., 2016. Hydro-Geo-Deformation Field Monitoring Data Based on the Flux Density of Radon from the Ground. In: MHI, 2016. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnoy i Shel'fovoy Zon Morya = Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. Sevastopol: MHI. Iss. 1, pp. 56–62 (in Russian).
15. Svensmark, H., Pedersen, J.O.P., Marsh, N.D., Enghoff, M.B. and Uggerhoj, U.I., 2007. Experimental Evidence for the Role of Ions in Particle Nucleation under Atmospheric Conditions. *Proceedings of the Royal Society A*, 463(2078), pp. 385–396. doi:10.1098/rspa.2006.1773
16. Ouzounov, D., Liu, D., Chunli, K., Cervone, G., Kafatos, M. and Taylor, P., 2007. Outgoing Long Wave Radiation Variability from IR Satellite Data Prior to Major Earthquakes. *Tectonophysics*, 431(1–4), pp. 211–220.
17. Kovaleva, S.K., 2015. Radon as Prediction of Earthquake. *History of Science and Engineering*, 12, pp. 81–85 (in Russian).
18. 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: MCITO, 2018. [*Modern Investigations in the Field of Natural, Technical, Physical and Mathematical Sciences*]. Kirov: MCITO, pp. 243–256 (in Russian).
19. Adushkin, V.V., Nifadiev, V.I., Chen, B.B., Popel, S.I., Kogai, G.A., Dubinskii, A.Yu. and Weidler, P.G., 2019. Variations of the Parameters of Internal Gravity Waves in the Atmosphere of Central Asia before Earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 487(1), pp. 841–845. doi:10.1134/S1028334X19070201

About the authors:

Igor S. Podymov, Senior Researcher, 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, 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*

Nicolai V. Esin, Head Researcher, 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 – primary data collection, processing and analysis, composition of the article draft

Tatiana M. Podymova – data analysis, article text correction

Nicolai V. Esin – data analysis, article text correction

All the authors have read and approved the final manuscript.