УДК 550.348.098.45:551.513 doi: 10.33933/2074-2762-2019-55-160-174

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТЕОРОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ РИСКАМИ

В.Н. Боков

Центр геофизических прогнозов «Градиент», viktor.bokov333@gmail.com

В последние годы проведены исследования метеорологических процессов, отражающих экзогенный вклад в сейсмичность Земли. Атмосферные процессы являются триггером возникновения землетрясений; подготовка последних обусловлена тектоническими и эндогенными процессами в земной коре. Выявленные связи позволяют успешно исследовать проблемы сейсмичности в межгодовом и сезонном диапазонах временной изменчивости на основе метеорологических данных. Для прогноза сейсмических событий было предложено использовать атмосферно-циркуляционный предвестник землетрясений.

Ключевые слова: атмосферные процессы, триггер, связи атмосферы и сейсмичности.

METEOROLOGY CAPABILITIES IN SEISMIC RISKS MANAGEMENT

V.N. Bokov

Center for Geophysical Forecasts "Gradient"

In recent years studies have been conducted on meteorological processes reflecting an exogenous contribution to the Earth seismicity. Atmospheric processes are the trigger of earthquakes; preparation of the latter is due to tectonic and endogenous processes in the earth's crust. The identification of the relationship allows us to successfully investigate the problem of seismicity in the inter-annual and seasonal temporal variability ranges on the basis of meteorological data. For the forecast of seismic events was proposed to use the atmospheric-circulation precursor of earthquakes.

Keywords: atmospheric processes, trigger, atmospheric and seismic relations.

Введение

Научные направления метеорология и сейсмология, на первый взгляд, имеют мало общего — пожалуй, лишь то, что оба направления входят в глобальную геофизику. Сейсмология — наука о распространении сейсмических волн в недрах Земли, землетрясениях и связанных с ними явлениях. Она находится на стыке многих наук — геологии, геофизики, физики, химии, биологии, истории и др. Однако, проводя исследования совместно с метеорологическими процессами, сейсмологи в основном ограничиваются использованием данных синхронных метеорологических наблюдений на одной — трех метеостанциях. Как правило, сейсмологи относят метеорологические процессы к помехам, которые искажают результаты их исследований. Поэтому в развитии модельных представлений о физике и механике разрушения земной коры, которое началось в XX веке, идеям

воздействия атмосферных процессов на сейсмичность места не нашлось. Справедливости ради следует подчеркнуть, что основатели сейсмологии [9, 13] признавали воздействие атмосферы на сейсмичность, но эти идеи не были подхвачены их последователями.

Перечислим ряд проблем сейсмологии, которые до сих пор не решены. Сейсмология «начинается» тогда, когда происходит значительное сейсмическое событие и с помощью возникающих сейсмических волн изучается внутреннее строение Земли. Процесс подготовки сейсмических событий для сейсмологов пока не понятен, как не определены и механизмы их подготовки. В основе практически всех моделей лежали идеи локализованного процесса подготовки каждого мощного землетрясения (ЗТ) и затухающего с расстоянием характера проявления предвестников этого ЗТ. При разработке моделей превалировали идеи физики и механики разрушения монолитных образцов. В моделях не конкретизировались движущие силы, рассматривались только силы тектонической природы без анализа природы режима слабой сейсмичности и повторяемости ЗТ в одних и тех же разрушенных местах разломов.

Дальнейшее развитие представлений о природе возникновения ЗТ до конца прошлого века шло по пути анализа, детализации и переноса данных лабораторных моделей разрушения на геологическую среду [14]. В данных моделях представления подготовки разрушения монолитных образцов переносили на условия земной коры, подготовку ЗТ связывали с долговременной эволюцией процессов трещинообразования от микроскопического до крупного масштаба (более километра). В некоторых моделях учитывалось наличие подземных вод, формирующих поровое давление и оказывающих влияние на объемное напряженное состояние подземной среды. Подобные модели различались детализацией процесса подготовки ЗТ, не внося дополнительного понимания в происходящие процессы и природу действующих сил [14].

Исследования по выявлению механизма очага ЗТ ведутся уже не один десяток лет. В основном эти исследования основываются на теории сплошных сред и механики разрушений, что в общем позволяет оценить механизм разрушения пород в очаге ЗТ [26]. Однако в качестве физических явлений, инициирующих определенный тип механизма очага подготовки ЗТ, рассматривают только тектонические и эндогенные процессы [28]. Роль экзогенных процессов исследована очень слабо. Изучая сейсмологический режим, временные и пространственные закономерности в сейсмоактивных районах Земли, сейсмологи часто не могут найти причины, обусловливающие временную изменчивость сильных сейсмических событий. Например, сезонная изменчивость мощных ЗТ до сих пор слабо изучена сейсмологами. Связано это с отсутствием в тектонике, эндогенных процессах, вращении Земли и других природных процессах [11, 12, 15, 22] физических причин, «ответственных» за внутригодовую изменчивость сейсмичности. Анализ межгодовой изменчивости сейсмических процессов основывается на исследовании временных рядов землетрясений различной магнитуды [27, 29, 35], а в качестве одной из основных причин межгодовой изменчивости рассматривают солнечную активность [35]. Тем не менее долгосрочные прогнозы сейсмологов

часто не позволяют точно оценить временной интервал, в котором произойдет сильное ЗТ.

Не все сейсмологи проводили исследования в традиционном для сейсмологии русле. Так, например, известный сейсмолог А.Д. Сытинский посвятил много лет исследованиям связей солнечной активности и атмосферы с сейсмичностью Земли [32—34]. Его революционные исследования в то время почти не воспринимались сейсмологами, поскольку им было не до атмосферы — с процессами внутри земной коры до сих пор сложно разобраться. Однако практические результаты А.Д. Сытинского, который составлял среднесрочные прогнозы (на два-три месяца) сейсмических событий на определенной территории, подтвердили влияние атмосферных процессов на сейсмичность Земли [34]. Существенно продвинуться в понимании подготовки сейсмических событий позволяет учет атмосферных процессов [2—8, 32—34].

Кратко перечисленные проблемы сейсмологии в исследованиях сейсмичности Земли, сейсмические риски могут быть решены с помощью подходов, отражённых в настоящей статье. Цель данной работы состоит в освещении роли метеорологии при решении части задач сейсмологии. В частности, краткосрочный прогноз землетрясений невозможно составить без участия метеорологов.

Роль атмосферных процессов в подготовке сейсмических событий

Анализ многочисленных случаев изменения атмосферной циркуляции, предшествующего сильным землетрясениям, позволил установить триггерные эффекты, способствующие возникновению сейсмических событий [4]. Смещения сопряженных циклона и антициклона приводят к колебаниям земной коры и возникновению волн Лява [30]. Атмосферные триггерные эффекты обусловлены быстрой сменой атмосферных вихрей противоположного знака в районе активных разломов, что приводит к резкому увеличению тангенциальных напряжений на разломе и возникновению землетрясений [4]. Для прогноза сейсмических событий в работах [4—7] было предложено использовать атмосферно-циркуляционный предвестник землетрясений. Под атмосферно-циркуляционным предвестником (АЦП) для фиксированного эпицентра землетрясения понимается такое изменение атмосферной циркуляции, при котором в данном эпицентре периодически инициируются новые землетрясения. Периодичность возникновения ЗТ зависит от степени «готовности» горных пород к разрушению [16, 28].

В многочисленных исследованиях геофизики постоянно выявляют влияние атмосферных процессов на поверхность земной коры. Однако, поскольку они не проводят пространственный анализ атмосферных процессов и их внимание сосредоточено на процессах, происходящих в земной коре, они и не воспринимают связи атмосферы с наблюдаемыми процессами. При этом сейсмологическая интерпретация наблюдаемых процессов часто носит предположительный характер. Так, при исследовании аварий трубопроводов на территории РФ показано, что аномалии региональных современных движений земной коры наблюдаются в относительно узких переходных зонах на границах блоковых структур [19].

В пределах таких зон выявлены аномальные смещения земной поверхности, амплитуда которых превышает на один-два порядка движения в смежных объемах среды. Кроме тектонических движений, наблюдаются и короткопериодные движения с более высокой скоростью смещения и периодом, равным месяцам, а иногда даже часам [19]. Эти относительные подвижки имеют периодический характер, который, по нашему мнению, связан с синоптической изменчивостью атмосферных процессов. При этом поверхность испытывает знакопеременные деформации, т.е. пучения до 215 мм сменяются оседаниями до 400 мм [19], которые, по мнению автора, определяются циклонами и антициклонами соответственно [4]. Указанные сведения лишь подчеркивают роль атмосферных процессов в увеличении интенсивности вертикальных движений на границах геоблоков. Практически все подобные геофизические исследования не сопоставляются с сопутствующими атмосферными процессами, и поэтому, как правило, сейсмологическая интерпретация подобных резких движений затруднена.

Процесс подготовки сейсмических событий и механизмы их подготовки логично рассмотреть с позиций влияния атмосферных нагрузок, волн и наклонов на геоблоки в зонах разломов. Самым распространенным механизмом подготовки землетрясений является механизм, названный автором механизмом «раскачки». Назван он так в связи с тем, что сопряженные циклоны и антициклоны, которые находятся по разные стороны разлома и последовательно сменяют друг друга, обеспечивают опускание или поднятие, колебания и наклоны геоблоков с разных сторон разлома, т.е. «раскачивают» геоблоки.

Можно предположить, что процесс подготовки землетрясения происходит следующим образом. Предположим, что произошло мощное землетрясение с магнитудой M = 7. После землетрясения в зоне разлома зацепы (выступы) между геоблоками сохраняются и укрепляются в горных породах последующими временными сериями афтершоков. Прекращение афтершоков свидетельствует о том, что зацепы (выступы) между геоблоками заняли устойчивое положение. При таком положении между геоблоками нет трещин, способных спровоцировать соскальзывание зацепов или выступов. Поэтому в течение нескольких месяцев, лет и даже десятилетий сильного землетрясения в данном месте не происходит. Однако за этот период времени геоблоки постоянно подвергаются ряду воздействий. На поверхность геоблоков в районе расположения разлома постоянно действуют переменные барические нагрузки. В результате наклонов и вертикальных движений геоблоков в разломе образуются микротрещины, которые моментально заполняются газовыми и водными флюидами. За этот период времени происходят медленные тектонические движения и «работают» эндогенные процессы, создавая напряжения на геоблоках. Одновременно на нижней границе геоблоков в зоне разлома под влиянием ее прогибов также образуются мелкие трещины.

Под влиянием давления магмы и высокой температуры мелкие трещины заполняются газовыми флюидами и со временем расширяются и растут в направлении к поверхности коры. Подтверждением этого процесса являются серии землетрясений, возникающих перед активизацией вулканов. Под влиянием перечисленных факторов мелкие трещины в верхней части коры постепенно расширяются

и с течением некоторого времени обеспечивают газовую и водную «смазку» для соскальзывания выступа. В конце концов наступает время, когда флюиды подготавливают трещины необходимой ширины, и зацеп оказывается в состоянии неустойчивости. Это состояние может сопровождаться форшоками, различными геофизическими предвестниками (выделение литосферных газов, появление геосейсмических шумов и т.п.) и продолжается до тех пор, пока в атмосфере не образуется типичный для данного района АЦП. Этот АЦП и инициирует подготовленное землетрясение. Предложенный процесс подготовки сейсмических событий относится к коровым землетрясениям.

Инициирование механизма очага землетрясения

Сейсмологи считают, что для прогнозирования ЗТ необходимо знать механизм возникновения очага ЗТ. Механизм очага описывает неупругие деформации, возникающие в области очага ЗТ (подвижку) и генерирующие упругие сейсмические волны. Механизм очага определяет ориентацию разрыва и направление подвижки, а также ориентацию главных осей напряжения сжатия и растяжения в пространстве. Исследования по выявлению механизма возникновения ЗТ ведутся уже не один десяток лет. В основном эти исследования основываются на теории сплошных сред и механики разрушений, что в общем позволяет оценить механизм разрушения пород в момент возникновения землетрясений. Однако в качестве физических явлений, обусловливающих подготовку того или иного типа очага ЗТ, рассматривают только тектонические и эндогенные процессы. Поэтому сейсмологи по-прежнему не могут разобраться в механизме образования первичной дизъюнкции, обусловливающей различные типы движения: сдвиги, взбросы и сбросы.

Традиционно считается, что механизм очага коровых ЗТ формируется в глубинах земной коры, и поэтому ответственными за тип механизма очага ЗТ «назначены» тектоника и эндогенные процессы [16, 28, 29, 31]. Имеющиеся данные повторных геодезических измерений в эпицентральных зонах сильных коровых землетрясений убедительно показывают, что процесс подготовки очага корового землетрясения затрагивает и земную поверхность [25]. Исследования последних трех лет показали, что атмосферные процессы являются не только триггерами землетрясений, но и, возможно, инициируют механизм возникновения очага землетрясений [8].

Использование стереограмм (рис. 1) при картировании сейсмических событий позволяет наглядно оценить тип фокальных механизмов землетрясений, произошедших на данной территории за определенный период времени. В качестве примера на рис. 2 приведена карта очагов землетрясений со стереограммами, характеризующими тип подвижек. Анализ стереограмм показывает, что практически в одной точке разлома могут образовываться различные типы подвижек — это видно из рис. 2.

В качестве одной из основных причин, по которой сейсмологи приняли парадигму о непрогнозируемости ЗТ, является хаотичность возникновения ЗТ [17].

Рис. 1. Стереограммы, соответствующие очагам сейсмического явления.

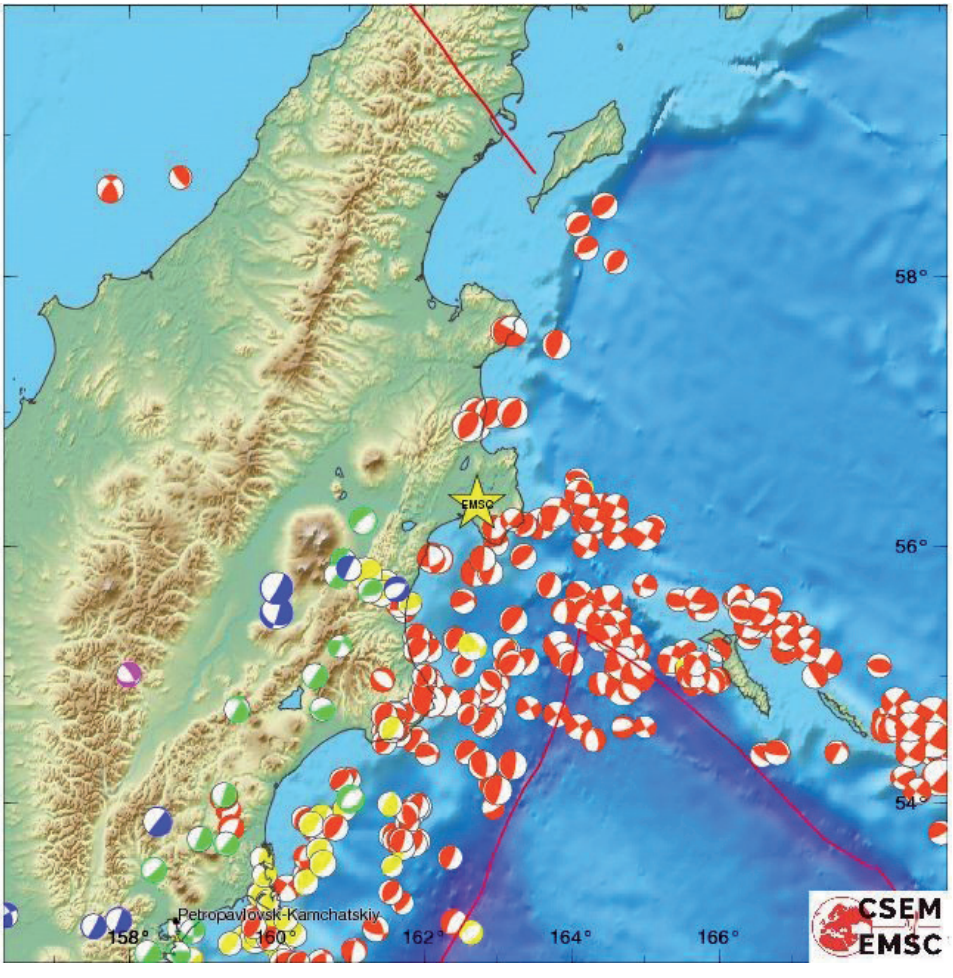

Рис. 2. Эпицентры землетрясений в районе Камчатки
и стереограммы фокальных механизмов очагов землетрясений.

Атмосфере свойствен динамический хаос, и возникновение различных атмосферных объектов (циклонов, антициклонов, ложбин, перемычек и т.п.) можно отнести к странным аттракторам [23].

Формирование АЦП происходит на основе пространственно-временной изменчивости странных аттракторов. В зависимости от пространственно-временных изменений странных аттракторов возможно определить возникновение в точке бифуркации того или иного типа механизма очага землетрясений. Так, на рис. 3 приведена типичная схема инициирования механизма очага по типу подвижки — взброс. Применение подобных схем позволяют наглядно пояснить сейсмологам причины инициирования первичной дизъюнкции в очаге ЗТ.

Из рис. 3 *а* видно, что над очагом ЗТ (в точке бифуркации) наблюдается область пониженного атмосферного давления. В этой области земная поверхность приподнимается, что приводит к растяжению земных пород, расширению трещин, увеличению водных флюидов и эманации литосферных газов. В смежных районах наблюдаются два вихря с повышенным атмосферным давлением. Через сутки (см. рис. 3 *б*), т. е. очень быстро, территорию над очагом ЗТ заняла область повышенного атмосферного давления, что привело к резкому сжатию пород, к соскальзыванию зацепа в теле разлома и, соответственно, к ЗТ.

Типичная схема формирования странных аттракторов, инициирующих первичную дизъюнкцию в очаге по типу подвижки — сброс, является противоположно зеркальной схемам, представленных на рис. 3. Несколько более сложными являются схемы для типов с правосторонним и левосторонними подвижками, но и они обусловлены типичными формированием пространственно-временного изменения странных аттракторов в атмосфере. Анализ изменения атмосферной циркуляции, который выявляет формирование АЦП, позволяет определить и возникновение того или иного типа механизма очага землетрясений.

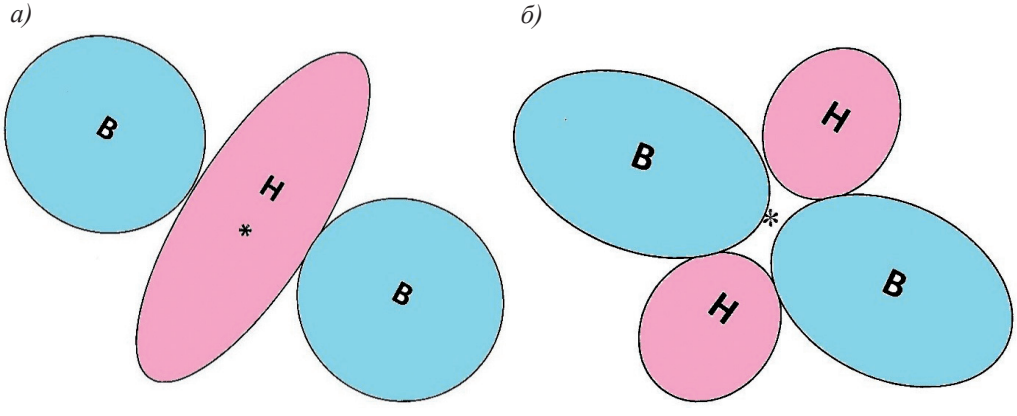

Рис. 3. Пространственное расположение странных аттракторов: начальный (*а*) и заключительный (*б*) этапы формирования очага по типу подвижки — взброс.

Звездочкой отмечен очаг ЗТ.

Роль метеорологических процессов в оценке сейсмических рисков

Нашу теорию, которую мы используем при прогнозе ЗТ [2—8, 32—34], подтверждают результаты недавних исследований геологов и сейсмологов под руководством академика С.В. Гольдина [10, 20, 21]. Группой ученых рассматривался вопрос о местах сосредоточения землетрясений в изменяющейся напряженно-деформированной среде. В работах О.А. Кучай [20, 21] привлекались данные о механизмах очагов землетрясений с M > 4,6, произошедших в сейсмоактивных регионах Земли с 1976 г. по март 2010 г. Исследовались разрывы в очагах ряда сильных землетрясений в пределах условной границы, разделяющей положительные и отрицательные значения деформаций в поле широтной, меридиональной и вертикальной компонент сейсмических деформаций. Исследования показали, что вспарывание разрывов при ряде сильнейших землетрясений инициируется на границе изолинии нулевой деформации, полученной при расчете сейсмической деформации по данным механизмов очагов предшествующих землетрясений. Подобные выводы получены и по данным GPS. Результаты представительных исследований различных научных направлений привели к одинаковому результату, что указывает на достоверность используемой нами теории. Однако указанные исследования геологов и сейсмологов не решают проблему прогноза ЗТ, особенно краткосрочного.

В настоящее время преобладающее большинство сейсмологов не считают возможным краткосрочный прогноз землетрясений. Так, в сентябре 2012 г. в ходе 33-й Генеральной ассамблеи Европейской сейсмологической комиссии (Москва) генеральный секретарь Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли П. Сухадолк признал, что в ближайшее время прорывных решений в сейсмологии не ожидается. Отмечалось, что ни один из более чем 600 известных предвестников и никакой их набор не гарантируют предсказания землетрясений, которые случаются и без предвестников. Уверенно указать место, время и мощность катаклизма не удается. Надежды на предсказания возлагаются лишь там, где сильные землетрясения происходят с некоторой периодичностью [17].

В ряде исследований, посвященных прогностическим разработкам, сейсмологи подтверждают влияние внешних сил (экзогенных процессов) на сейсмические события. Например, многолетние исследования и прогностические разработки на основе гидрогеодинамического предвестника, выполненные на Дальнем Востоке, на Сахалине, показали, что «…краткосрочные предвестники проявляются однотипно, и их возникновение не зависит ни от места землетрясения, ни от глубины очага, ни от силы удара. Следовательно, они вызваны не геологическими причинами, а изменением физических условий в приповерхностном слое накануне сейсмического события…» [30]. Проведенные в РГГМУ исследования [4—8], основанные на изучении связей между атмосферными процессами и сейсмичностью, убедительно показали соответствие приведенным выше наблюдениям.

Многолетние исследования позволили предположить, что изменения физических условий в приповерхностном слое земной коры происходят под влиянием изменений атмосферного давления и изменений уровня водной поверхности [2, 6]. В

свою очередь, неприливные изменения уровня водной поверхности определяются в основном атмосферной циркуляцией. В обзоре [14] был поставлен вопрос о том, «…что не позволяет решить проблему прогноза, хотя во многих регионах созданы долговременно и непрерывно работающие системы мониторинга. Иллюстрацией действующей ситуации является пропуск Великого японского землетрясения 11 марта 2011 г., хотя условия для мониторинга были уникальны. Фокальная зона находится от сети мониторинга на расстоянии 100—200 км. Это зона постоянной сейсмической опасности, и ее мониторинг осуществлялся непрерывно и долговременно…». Этот очередной случай внезапного для сейсмологов сильнейшего землетрясения при непрерывном мониторинге геофизических процессов снова указывает на отсутствие учета факторов не только в сейсмологических процессах, но и других — внешних. Однако это землетрясение, как и множество других, было предсказано на основе мониторинга изменений атмосферной циркуляции [5]. Именно быстрые смещения атмосферных вихрей, распределяющие воздушные массы на пространстве земной поверхности, приводят к росту напряжений и деформаций в земной коре.

Деформации, возникающие под влиянием атмосферной циркуляции, могут обусловливать появление различного рода геофизических предвестников. В работах [6—7] исследованы синхронные изменения атмосферной циркуляции и данные измерений геофизических предвестников, которые широко используются для прогноза ЗТ. К таким предвестникам относят геоакустические шумы, эмиссию радона, изменение уровня подземных вод, деформацию и наклоны земной коры. Больше всего сейсмологов беспокоит тот факт, что в некоторых случаях при появлении апробированных предвестников землетрясения не происходят, а при их отсутствии —возникают. При этом ведется мониторинг как первичных, так и вторичных предвестников. Однако без учета экзогенных процессов разобраться в причинах этого феномена еще долго не удастся. Связано это с тем, что деформации, возникающие под влиянием атмосферной циркуляции, обусловливают усиление различного рода геофизических предвестников, которые часто считают проявлением интенсивности тектонических или эндогенных процессов.

Рис. 4. Географическое расположение пунктов измерений Хазар и Кум-Даг.

В качестве примера, показывающего состоятельность геофизических предвестников в прогностических целях при условии анализа изменчивости атмосферных процессов, рассмотрим результаты мониторинга содержания подпочвенного радона (^{222}Rn). Используемые геофизические данные приведены в работе [18], посвященной исследованию динамики концентрации подпочвенного радона (^{222}Rn) на территории Прикаспийского сейсмоактивного региона Туркменистана.

Регион характеризуется сложным геолого-тектоническим строением, отличается высоким уровнем тектонической и сейсмической активности недр, грязевулканической деятельностью и другими явлениями, природа которых обусловлена деформационными процессами [18]. Географическое расположение двух пунктов измерений радона — Хазар и Кум-Даг — представлено на рис. 4. Аномальные изменения наблюдаемых параметров отмечались, когда в районе исследования произошло землетрясение энергетического класса $K = 10…11$.

На рис. 5 *а* представлены изменения концентрации подпочвенного радона в пункте Кум-Даг с 20 по 31 августа 2010 г. В регионе наблюдения 27 августа ($K = 11{,}2$) и 28 августа ($K = 10{,}9$) произошли сейсмические события. Из рисунка видно, что за несколько дней до сейсмического события наблюдалось повышение

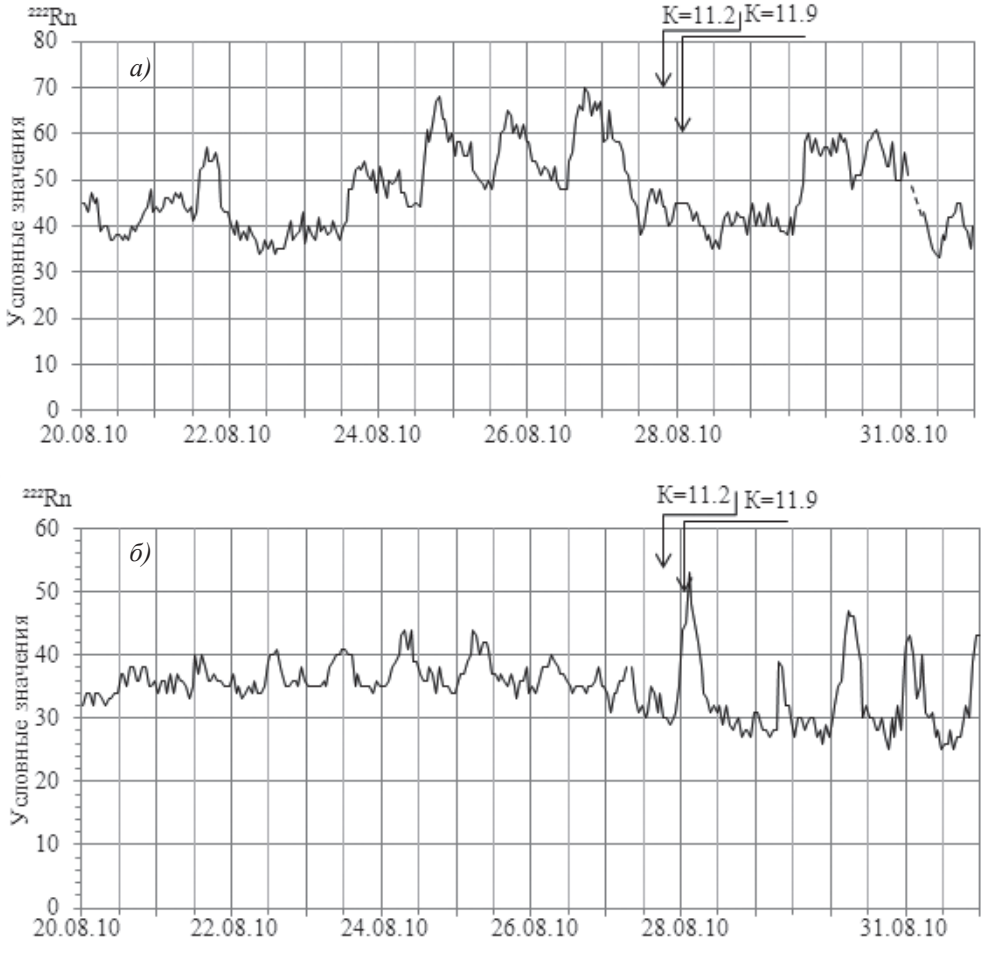

Рис. 5. Изменения концентрации (условные значения) подпочвенного радона в пунктах Кум-Даг (*а*) и Хазар (*б*) с 20 по 31 августа 2010 г.

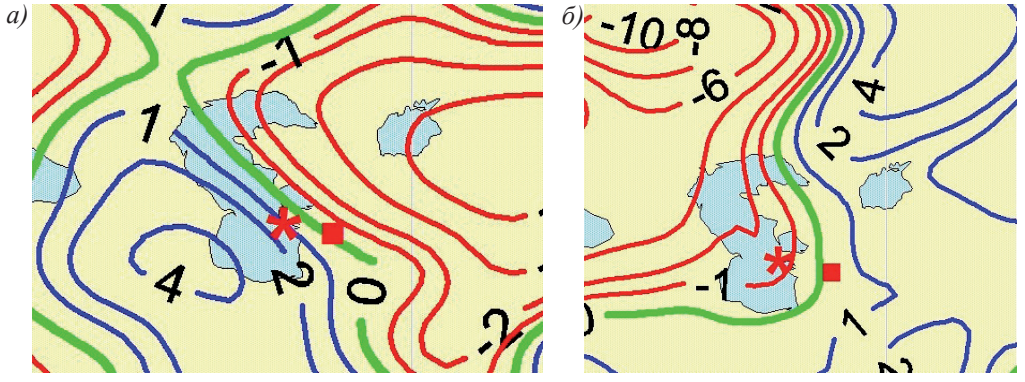

Рис. 6. Поле барических нагрузок 25 августа 2010 г. (*а*) и 28 августа 2010 г. (*б*).

содержания газа, а его амплитуда испытывала значительные колебания, что было связано с уменьшением барических нагрузок (рис. 6 *а*) в восточной части региона. Непосредственно перед землетрясениями концентрация радона понизилась до прежних значений и амплитуда колебаний также уменьшилась, что было обусловлено ростом барических нагрузок в восточной части региона (см. рис. 6 *б*).

На рис. 5 *б* представлены изменения концентрации подпочвенного радона в пункте Хазар с 20 по 31 августа 2010 г. Из рисунка отчетливо видно, что перед сейсмическими событиями, 27 и 28 августа 2010 г., временной ход концентрации радона относительно стабилен. Не наблюдается резкого увеличения интенсивности эманаций радона, что связано с уменьшением барических нагрузок (см. рис. 6 *а*) в западной части региона. Нарушение регулярности хода концентрации радона в подпочвенном воздухе отмечались непосредственно после сейсмических событий, т.е. после смещения линии нулевой деформации к востоку. Резкое изменение амплитуды колебаний после сейсмических событий связано с увеличением барических нагрузок в западной части региона (см. рис. 6 *б*).

Приведенный пример совместного анализа косвенных предвестников и изменения атмосферной циркуляции в очередной раз показал, что интенсивность и возникновение рассмотренных предвестников тесно связаны с барическими изменениями. Под воздействием барических нагрузок интенсивность предвестников увеличивается, и это указывает на вероятность возникновения землетрясения. Случаи, когда усиливаются предвестники, а землетрясения не происходит, вероятно, связаны с отсутствием в это время триггера — АЦП, характерного для данного сейсмического района. Этого и не понимают сейсмологи, поскольку не учитывают роль экзогенных процессов. Также сейсмологам не ясно, почему при отсутствии апробированных предвестников возникают землетрясения. Исследований на эту тему у сейсмологов практически нет.

В последние десять лет интерес к прогнозу землетрясений снова возрос. После мощного землетрясения в китайской провинции Сычуань в 2013 г. правительством КНР было решено вложить в прогноз сейсмических явлений более 300 млн долларов [37]. Для наиболее опасных районов страны будет создана сеть

из 5000 станций наблюдений, цель которых — раннее предупреждение о сильном землетрясении. Однако события в Японии показывают, что многочисленные пункты сейсмологических и геофизических измерений не помогли предсказать событие 2011 г., как и ряд других.

Сейчас благодаря интерферометрическим радиолокационным станциям с синтезированной аппаратурой InSAR ученые-геофизики могут получать глобальную картину. Новый подход предусматривает развертывание радиолокационных устройств на спутниках и использование сравнительных изображений, полученных через определенный интервал времени, для визуализации общего движения поверхности Земли. Данные таких измерений характеризуются чрезвычайно высокой точностью, вплоть до нескольких миллиметров [36].

Даже имея в арсенале мониторинга такую точную систему наблюдений, сейсмологи не смогут составлять краткосрочные прогнозы ЗТ. Любые наблюдения за изменением процессов на поверхности земной коры очень полезны, но они не содержат прогностической составляющей, что сводит на нет возможность эффективного прогноза. Особенно сложно сейсмологам предсказать дату и мощность ЗТ. Только метеорологическая информация содержит прогностическую составляющую, и только по ней можно за двое-трое суток (с достоверность прогноза не менее 75 %) определить формирование триггера, инициирующего ЗТ.

Связь внутригодовой изменчивости атмосферных процессов и сейсмичности

Исследование сезонной изменчивости сейсмичности еще не получило признания у сейсмологов, поскольку причины внутригодовой изменчивости было неясны. Единого мнения о внутригодовом распределении сильных ЗТ с магнитудой $M \geq 5{,}5$ среди сейсмологов нет. В ряде работ сезонный ход сильных ЗТ даже отрицается [15]. Это связано с тем, что сейсмологи не видят других физических причин, обусловливающих сезонную изменчивость ЗТ, кроме изменчивости сезонного хода скорости вращения Земли [1, 11, 12] и приливных воздействий с периодичностью движения Земли по орбите [22]. Сейсмическая активность показала наличие связи сезонной изменчивости с приливным воздействием только для слабых и умеренных сейсмических явлений. Сезонная изменчивость сильных ЗТ до сих пор достоверно не определена.

Исследования влияния атмосферной циркуляции в синоптическом диапазоне изменчивости показали, что ЗТ инициируются быстрыми процессами смещений сопряженных циклонов и антициклонов. Подобные процессы имеют хорошо выраженную внутригодовую изменчивость. Следовательно, сезонная изменчивость атмосферной циркуляции должна коррелировать с сезонной изменчивостью сильных ЗТ. Результаты подобных исследований представлены в работе [3]. Исследования подтвердили наличие тесной связи сезонной изменчивости атмосферной циркуляции с сезонной изменчивостью сильных ЗТ для различных сейсмоактивных регионов Земли. Исследование связей сезонной изменчивости сильных ЗТ очень важно и в связи с выбором АЦП.

Связь межгодовой изменчивости атмосферных процессов и сейсмичности

В большинстве публикаций межгодовую изменчивость сейсмичности связывают с изменчивостью солнечной активности [35]. Дальнейшие исследования [32, 34] показали, что солнечная активность воздействует и на атмосферу, а циркуляция атмосферы влияет на сейсмичность. Действительно, совместный анализ синхронных временных рядов форм циркуляции атмосферы Вангенгейма — Гирса и сильных ЗТ в диапазоне межгодовой изменчивости показал их согласованность. Типизация атмосферных процессов Вангенгейма — Гирса содержит «гомологи», в которых присутствуют траектории циклонов и антициклонов, что отражает их подвижность и характеризует триггерные эффекты атмосферных вихрей. Совместный анализ временной изменчивости меридиональных форм циркуляции атмосферы с числом ЗТ с $M \geq 7$, а также с числом ЗТ с $M > 8$ показал хорошо выраженную согласованность временного хода и статистически значимую корреляцию [2].

Методы долгосрочных прогнозов сильных ЗТ основываются на их временной зависимости и вероятности проявления во времени. Климатические прогнозы циркуляции атмосферы, основанные на типизации Вангенгейма — Гирса позволяют определить периоды преобладания меридиональных форм циркуляции, и, следовательно, уточнить интервал времени прогноза с вероятностью разрушительных ЗТ. Поэтому для повышения точности среднесрочных и долгосрочных прогнозов землетрясений сейсмологам можно рекомендовать учитывать межгодовую изменчивость циркуляции атмосферы.

Заключение

Современная сейсмология до сих пор не может составлять краткосрочные прогнозы с указанием точного места, даты и силы ЗТ. По мнению сейсмологов, причины возникновения ЗТ изучены недостаточно, поскольку процессы, происходящие внутри земной коры, не доступны для визуального исследования и процесс возникновения ЗТ еще долго будет оставаться теоретическим природным явлением. Однако даже длительные и успешные исследования процессов, происходящих в земных недрах, не позволят решить проблему краткосрочных прогнозов ЗТ, и связано это с тем, что триггером ЗТ являются атмосферные процессы. Поэтому без совместного использования атмосферно-циркуляционных и геофизических предвестников получить более точные краткосрочные прогнозы ЗТ не удастся, о чем свидетельствуют многолетние сейсмологические разработки и метеорологические исследования [2—8]. Чтобы решить задачу краткосрочного прогноза ЗТ, необходимы дальнейшие совместные исследования метеорологов, геофизиков и сейсмологов.

Более того, причина возникновения механизма очага ЗТ различного типа подвижек традиционными методами не решается десятилетиями. Применение технологий, основанных на данных о полях атмосферного давления, приблизило решение этой проблемы. Пространственно-временной анализ атмосферной циркуляции в синоптическом диапазоне позволил установить, что инициирование

типа механизма очага ЗТ происходит в зависимости от смены пространственного расположения атмосферных вихрей разного знака [4]. Взаимное пространственное расположение циклонов и антициклонов и его резкое изменение в течение одних-двух суток позволяет уверенно выявить и спрогнозировать механизм очага — сброс или взброс, левосторонние или правосторонние сдвиги [8].

Интенсивность геофизических предвестников ЗТ увеличивается под воздействием барических нагрузок, и это указывает на вероятность возникновения землетрясения. Случаи, когда усиливаются предвестники, а ЗТ не происходят, связаны с отсутствием в это время триггера — АЦП, характерного для данного сейсмического района. Это сложно понять сейсмологам, поскольку они не учитывают роль экзогенных процессов. Также сейсмологам не ясно, почему при отсутствии апробированных предвестников возникают землетрясения. Исследований на эту тему у сейсмологов практически нет.

Метеорология может решить часть задач сейсмологии в межгодовом диапазоне изменчивости и, особенно, в сезонном ходе сильных ЗТ. Так, в результате выявления физических причин, инициирующих сильные ЗТ, в частности внутригодовой изменчивости подвижных циклонов и антициклонов, удалось установить существование сезонной изменчивости мощных ЗТ.

Список литературы

1. *Барсуков О.М., Шаманин С.В.* Сезонные изменения сейсмичности и скорости вращения Земли // Доклады РАН. 2001. Т. 379, № 1. С. 99—100.
2. *Боков В.Н.* Межгодовая изменчивость сейсмичности и атмосферной циркуляции // Ученые записки РГГМУ. 2008. № 6. С.139—147.
3. *Боков В.Н.* О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С.89—100.
4. *Боков В.Н, Гутшабаш Е.Ш., Потиха Л.З.* Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С.173—184.
5. *Боков В.Н.* Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и Жизнь. № 9. 2011. С. 49—59.
6. *Боков В.Н.* О связи геофизических предвестников с краткосрочным прогнозом землетрясений / В сб.: Актуальные проблемы современной сейсмологии. Труды Междунар. конф., посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г. А. Мавлянова АНРУз, 12—14 октября 2016 г. С. 214—220.
7. *Боков В.Н.* Влияние экзогенных процессов на аномалии поверхностной температуры земной коры — предвестников землетрясений / В сб.: Актуальные проблемы современной сейсмологии. Труды Междунар .конф., посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г. А. Мавлянова АНРУз, 12—14 октября 2016 г. С. 208—214.
8. *Боков В.Н., Лебедев С.В.* Экзогенные процессы и сейсмичность / В сб.: Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы IV Всерос.конф.с международным участием. Москва, 6—9 июня 2017 г. / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2017. С. 379—386.
9. *Голицын Б.Б.* Лекции по сейсмометрии // СПб: Типогр. императорской АН, 1912. 486 с.
10. *Гольдин С.В., Кучай О.А.* Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физическая мезомеханика. 2008. № 11. С. 5—13.
11. *Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А., Трапезников Ю.А., Фридман А.М.* О корреляции графиков угловой скорости вращения Земли и модуля ее временной производной с частотой землетрясений в зависимости от их магнитуды // Физика Земли. 1994. № 10. С. 33—38.
12. *Гохберг М.Б.* и др. О механизме модуляции количества сильных землетрясений и частоты вращения Земли // Доклады РАН. Геофизика. 1995. Т. 341, № 3. С. 813—815.

13. *Гутенберг Б.* Основы сейсмологии. М.—Л.: ОНТИ. 1935. 146 с.
14. *Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н.* Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2, № 4. С. 378—315.
15. *Дещеревская Е.В., Сидорин А.Я.* Ложная годовая периодичность землетрясений, обусловленная сезонными изменениями помех // Доклады РАН. 2005. Т.400, № 6. С.798—802.
16. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.
17. *Завьялов А.Д.* 33-я генеральная ассамблея Европейской сейсмологической комиссии (Россия, Москва, 19—24 августа 2012 г.) и 9-я Международная молодежная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» 33-й ГА ЕСК (Россия, Обнинск, 25—30 августа 2012 г.) // Вулканология и сейсмология. 2013. № 3. С. 69—76.
18. *Ишанкулиев Дж., Сарыева Г.Ч., Азимов К.П., Азимова Н.К.* Динамика уровня подземных вод, концентрации подпочвенного радона и молекулярного водорода в прикаспийском сейсмоактивном регионе Туркменистана / В сб.: Актуальные проблемы современной сейсмологии. Материалы междунар. Конф., посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г.А. Мавлянова АНРУз, 12—14 октября 2016 г. С. 234—241.
19. *Копылов И.С.* Научно-методические основы геоэкологических исследований нефтегазоносных регионов и оценки геологической безопасности городов и объектов с применением дистанционных методов / Афтореф. дис. … д-ра геол.-минерал. наук. Пермь, 2014.
20. *Кучай О.А.* Особенности проявления сильных землетрясений в поле сейсмотектонических деформаций // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1, № 3. С. 285—296.
21. *Кучай О.А., Бушенкова Н.А.* Мезанизмы очагов землетрясений Центральной Азии // Физическая мезомезаника. 2009. Т. 12, № 1. С. 17—24.
22. *Левин Б.В., Сасорова Е.В., Журавлев С.А*. Внутригодовая повторяемость активизации сейсмического процесса для Тихоокеанского региона // Доклады РАН. 2005. Т. 403, № 4. С. 534—540.
23. *Лоренц Э.* Детерминированное непериодическое движение / В кн.: Странные аттракторы. М., 1981. С. 88—116.
24. *Монахов Ф.И., Хантаев А.М., Сапрыгин С.М.* Новые данные о гидрогеодинамическом эффекте, предшествующем землетрясениям // Известия АН СССР. Физика Земли. 1980. № 1. С. 105—107.
25. *Певнев А.К.* Прогноз землетрясений — место геодезического мониторинга в его решении // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 23. С. 105—116.
26. *Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясения // Доклады РАН. 2005. Т. 400, № 3. С. 372—377.
27. *Рогожин Е.А., Куланин Н.В.* О долгосрочной периодичности сейсмической активности Кавказско-Восточного-Анатолийского региона // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41, № 2. С. 23—29.
28. *Рогожин Е.А*. Потенциальные сейсмические очаги и сейсмологические предвестники землетрясений — основа реального сейсмического прогноза. М., 2011. 368 с.
29. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
30. *Сидоренков Н.С*. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука, 2001. 375 с.
31. *Соболев Г.А., Пономарев А.В*. Физика землетрясений и предвестники // М.: Наука, 2003. 270 с.
32. *Сытинский А.Д., Боков В.Н., Оборин А.Д.* Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т. 43, № 1. С. 136—142.
33. *Сытинский А.Д.* О планетарных атмосферных возмущениях во время сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37, № 2. С.132—134.
34. *Сытинский А.Д*. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 100 с.
35. *Шестопалов И.П., Харин Е.П.* Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности // Геофизический журнал. 2006. Т. 28, № 4. С. 59—70.
36. Электронный ресурс: http://gearmix.ru/archives/37847
37. Электронный ресурс: https://www.epochtimes.ru/kitaj-sozdast-sistemu-ekstrennogoopoveshheniya-o-zemletryaseniyah-99035049/#/