

УДК 551.513:550.344.37

В.Н. Боков, В.Н. Воробьев

ИНИЦИИРОВАНИЕ «БЫСТРЫХ» ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ АТМОСФЕРНЫМ ТРИГГЕРОМ

Российский государственный гидрометеорологический университет, vnv@rshu.ru

V.N. Bokov, V.N. Vorobiev

THE INITIATION OF THE “FAST” EARTHQUAKES BY ATMOSPHERIC TRIGGER

В статье рассматривается существование более быстрых сейсмических процессов, чем тектонические процессы длительностью десятки лет. Показано, что изменения атмосферной циркуляции являются триггером сейсмических событий, подготовленных эндогенными процессами. Процесс инициирования быстрых сейсмических событий представлен на примере землетрясений Италии в 2016 г. Полученные результаты могут быть использованы в геофизике при разработке технологии прогнозирования сейсмических событий.

Ключевые слова: изменения атмосферной циркуляции, сейсмичность, поля деформации.

The paper considers the existence of faster seismic processes than tectonic processes lasting dozens of years. It is shown that changes in atmospheric circulation are a trigger of seismic events prepared by endogenous processes. The process of initiating fast seismic events is illustrated by the example of earthquakes in Italy in 2016. The obtained results can be used in geophysics when developing the technology of forecasting seismic events.

Keywords: changes of atmospheric circulation, seismicity, deformation fields.

Введение

В 2016 г. в Италии произошла серия сильных землетрясений, в том числе с магнитудой $M \geq 6$. До этих сейсмических событий землетрясение с $M > 6$ на территории Италии произошло в апреле 2009 г. В целом по Земле число сильных землетрясений колеблется от года к году. Однако наибольшее число сильнейших из них наблюдалось в периоды преобладания меридиональных форм атмосферных процессов *C* и *E* (по типизации Вангенгейма–Гирса) [3].

К сожалению, гибнут люди, но сейсмологи по-прежнему основное внимание уделяют исследованию процессов, которые возникают уже после произошедшего землетрясения. Массово устанавливают сейсмостанции, поскольку они стали более совершенны и дешевле. Однако геофизические приборы, измеряющие

процессы в земной коре, предшествующие возникновению землетрясений, сейчас почти не устанавливаются, а многие существующие не эксплуатируются. Поэтому геофизические предвестники землетрясений пытаются совмещать с сейсмологическими, хотя прогностическая значимость последних представляется весьма ограниченной [16]. Считается, что все известные предвестники землетрясений появляются в результате воздействия на них деформационных процессов. Поэтому большинство зафиксированных предвестников землетрясений, за исключением деформации и наклонов земной коры, являются вторичными.

В качестве одной из основных причин, влияющих на быстрые изменения деформации и наклонов земной коры, рассматривается пространственно-временная изменчивость атмосферного давления [2–10, 18].

Методология

Анализ синоптических ситуаций (более 1500 случаев), предшествующих возникновению сильных землетрясений с $M > 6$, для различных сейсмоактивных регионов Северного полушария показал, что вокруг эпицентра землетрясения на расстоянии с радиусом около 1000 км наблюдаются закономерные изменения в атмосферных процессах [5, 18]. Эти закономерные изменения атмосферных процессов определены как атмосферно-циркуляционные предвестники (АЦП) [6, 9]. С помощью АЦП возможно прогнозировать землетрясения. Точность прогноза существенно зависит от качества метеорологических данных и повторяемости АЦП для рассматриваемого сейсмически активного региона [2, 10]. Для рассматриваемого сейсмически активного региона атмосферные поля АЦП являются идентичными, а эпицентры землетрясений в подавляющем числе случаев находятся в зоне нулевой деформации. Данный научный результат не противоречит классической теории Рейда механизма возникновения землетрясения [21].

Исследования по механизму возникновения землетрясений в основном основываются на теории сплошных сред. Однако фундаментальный результат по обоснованию механизма возникновения землетрясения до сих пор не получен. Разработано несколько моделей механизма возникновения землетрясения, но ни одна из них не позволила получить практическую технологию краткосрочного прогноза землетрясений [16, 17]. При этом публично утверждается, что краткосрочный прогноз землетрясений невозможен.

Нашу теорию, которую мы используем при прогнозе землетрясений, подтверждают результаты недавних исследований, проведенных геологами и сейсмологами под руководством академика С.В. Гольдина [11]. В работах О.А. Кучай [14] привлекались данные о механизмах очагов землетрясений [Harvard CMT Catalog] 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 величины 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 многочисленным данным GPS-наблюдений [14].

Данные представительных исследований двух различных научных направлений привели к одинаковому результату, что указывает на достоверность используемой теории. В связи с этим следует пересмотреть существующие теории и разработать новую теорию механизма возникновения землетрясения с учетом образования разрывов на границе изолинии нулевой деформации. Практика является самым лучшим критерием теории. За 16 лет составления опытных краткосрочных прогнозов землетрясений с последовательной разработкой информационной базы АЦП получен статистически значимый хороший результат [5, 9].

На основе выполненных исследований был разработан сейсмо-синоптический метод краткосрочного прогноза землетрясений с заблаговременностью в 2–3 суток, который имеет оправдываемость около 75 % [5, 9]. Оценка оправдываемости включает все землетрясения — слабые, умеренные и сильные. Этот результат является очень важным подтверждением и пониманием того, что изменение напряженно-деформационного состояния среды и образование колебаний в земной коре обеспечивают постоянно смещающиеся воздушные вихри [6] совместно с воздействием эндогенных процессов [7–10]. Влияние других сил на сейсмичность проявляется избирательно.

Традиционно большинство геологов относят напряжения и деформации, наблюдаемые в земной коре, к влиянию тектонических процессов. Существование в земной коре геоблоков указывает на необходимость учета и других внутренних и внешних сил, кроме тектонических движений, влияющих на процессы подготовки и возникновения землетрясений. Блочная структура земной коры приводит к появлению дополнительных степеней свободы и к появлению подвижности и реакции даже на очень слабые воздействия [13]. Поэтому ряд геологов считает, что основное влияние на процессы подготовки и возникновения землетрясений оказывают эндогенные явления [12, 15]. Другие ученые предполагают комбинирование влияния эндогенных и экзогенных сил на процессы подготовки и возникновения землетрясений [7–10, 16]. Экзогенные силы проявляются в качестве триггера землетрясений, которые определенное время подготавливались эндогенными процессами [6–10].

Поскольку тектонические движения являются медленными, то и процесс подготовки и возникновения землетрясений традиционно считают длительным, порядка десятилетий и сотни лет. Однако на тектонических разломах и границах геоблоков землетрясения с $M > 6$ происходят значительно чаще, в некоторых регионах несколько раз в месяц [16]. Это означает, что процесс возникновения землетрясений связан не только с тектоническими движениями, но и с другими, более быстрыми природными явлениями.

Например, установлено, что приливные явления имеют корреляцию со слабыми землетрясениями [19, 20]. Связь приливов со слабой сейсмичностью определяется с периодом около 1 суток. Это означает, что сейсмичности свойственны существенно более быстрые процессы, чем характерный процесс накопления тектонических деформаций. Установлены и другие быстрые усиления сейсмичности с периодом 3–7 суток [12]. Этот период быстрых сейсмических процессов, совпадающий с естественным синоптическим периодом [8, 9], представляет наибольший интерес в целях краткосрочного прогноза землетрясений.

Подчеркнем, что для приливных явлений связь с сильными землетрясениями отсутствует [19]. Это связано с тем, что приливной «горб» смещается равномерно, без ускорений и не обеспечивает резких напряжений в земной коре. Возникающие при этом слабые землетрясения подобны слабым лунотрясениям [1]. В целом на других планетах, где нет атмосферы, таких как Марс, землетрясения происходят редко, и они существенно отличаются от землетрясений на Земле.

На Земле с атмосферными процессами коррелируют все землетрясения, от слабых до сильнейших, и в различных диапазонах временной изменчивости [9].

Триггерный эффект атмосферной циркуляции

Сейсмические события в Италии 2016 г. также уверенно прогнозировались с использованием сейсмо-синоптического метода [9]. В качестве АЦП использовались случаи землетрясений на территории Италии за прошлые годы, а также случай сильного землетрясения, наблюдавшийся в Италии 6 апреля 2009 г. В Центральной Италии (координаты: $42^{\circ} 42'$ с. ш., $13^{\circ} 39'$ в. д.) 6 апреля 2009 г. в 01 ч 36 мин гринвичского времени произошло разрушительное землетрясение с $M = 6,3$, при котором погибли 297 человек. Кратко рассмотрим изменения синоптических условий, сопутствующих данному землетрясению.

Триггерный эффект атмосферной циркуляции на территории Италии проявился в последующих атмосферных изменениях, представленных на рис. 1. За трое суток до землетрясения (рис. 2) наблюдались повышенные барические нагрузки на геоблоки Северной Европы и пониженные барические нагрузки на геоблоки Апеннинского полуострова. В последующие трое суток синоптическая обстановка сменилась таким образом, что над Европой сформировался антициклон с центром над Германией и образовался гребень повышенного атмосферного давления над Апеннинским полуостровом. Этот процесс обеспечил быстрое увеличение напряжений на геоблоки Центральной Европы и Италии (см. рис. 2) с последующей их деформацией и возникновением землетрясения.

Простейшую модель относительного смещения двух геоблоков, разделенных межблоковой контактной границей с определенными свойствами, можно представить в следующем виде по аналогии с работой [13]. Под влиянием вариации атмосферного давления формируется движение этих блоков с разными скоростями $V_1(t)$ и $V_2(t)$. Скорость относительного движения $V(t) = V_1(t) - V_2(t)$, а величина смещения межблоковой границы $W(t) = \int_0^t V(t) dt$. Контакт между блоками связан с сдвиговой жесткостью k . Изменение касательного напряжения σ при межблоковом смещении связано соотношением:

$$\frac{d\sigma}{dt} = -kW.$$

Дальнейшее описание деформационного процесса определяется реологическими свойствами межблокового контакта. Также существенное значение имеет величина угла наклона геоблока под влиянием изменения атмосферной циркуляции [7].

Более четко триггерный эффект атмосферных процессов проявляется по результатам расчетов полей барических нагрузок, которые представлены на рис. 3.

Из рисунка видно, что увеличение барических нагрузок к 6 апреля наблюдалось в Центральной Европе и над Северной Африкой. Над эпицентром землетрясения располагается изолиния нулевой деформации. Эпицентр отмечен звездочкой. Подчеркнем, что изменения атмосферных процессов могут отличаться для региона с наличием горных хребтов даже при небольшом различии пространственного расположения эпицентров.

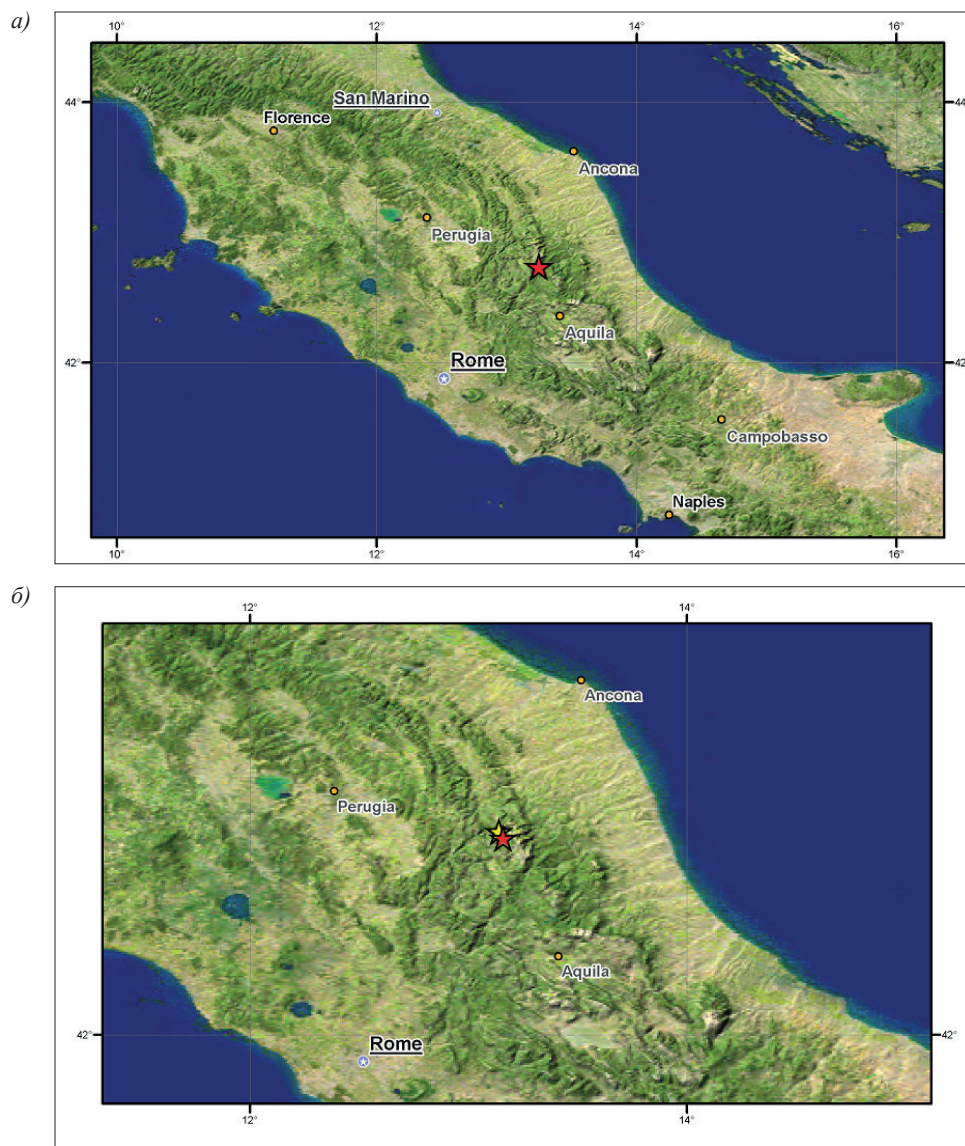


Рис. 1. Местоположение эпицентра землетрясения: *а* — 6 апреля 2009 г., $M = 6,3$; *б* — 26 октября (желтая звезда) $M = 6,2$ и 30 октября (красная звезда) 2016 г., $M = 6,7$

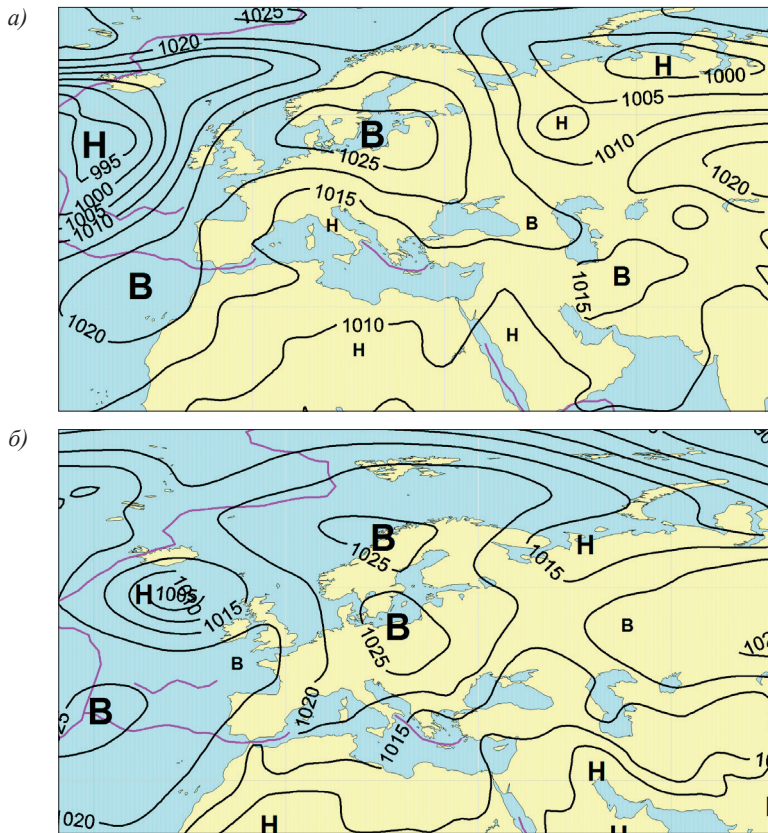


Рис. 2. Барические поля: а — 3 апреля 2009 г.; б — 6 апреля 2009 г.

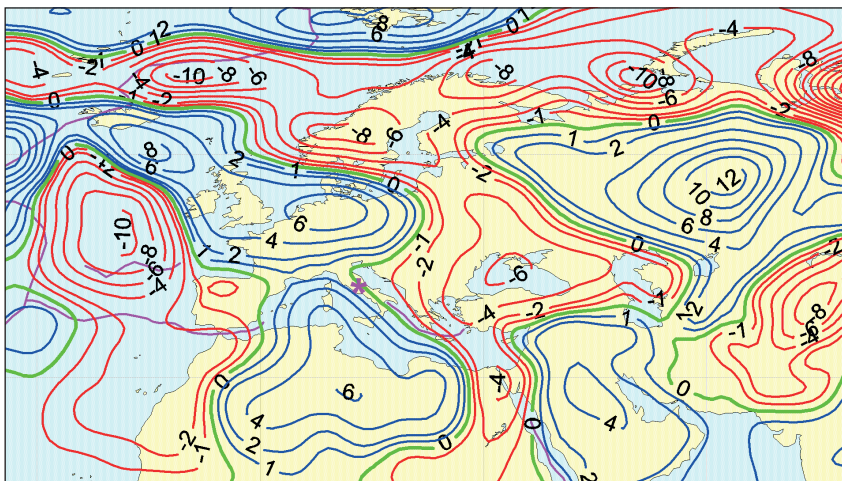


Рис. 3. Рассчитанное поле барических нагрузок на 6 апреля 2009 г. в Италии с $M = 6,3$

Рассмотрим атмосферные процессы для сильных сейсмических событий на территории Италии в октябре 2016 г.

В Центральной Италии 26 октября 2016 г. в 17 ч 10 мин гринвичского времени (координаты: $42^{\circ} 92'$ с. ш., $13^{\circ} 13'$ в. д.) произошло разрушительное землетрясение с $M = 5,3$. Через 2 часа 8 минут — в 19 ч 18 мин гринвичского времени — произошел повторный толчок с $M = 6,2$. Координаты данного землетрясения отличаются от координат землетрясения 6 апреля 2009 г. (см. рис.1).

Начальные условия атмосферной циркуляции, сопутствующие этому сейсмически активному дню, немного отличны от 3 апреля 2009 г., что связано с сезонной изменчивостью атмосферных процессов [4]. Как и для случая 2009 г., за трое суток до землетрясения (рис. 4) наблюдались повышенные барические нагрузки на геоблоки, расположенные в Северо-Восточной Европе, и пониженные барические нагрузки на геоблоки Апеннинского полуострова. В последующие трое суток синоптическая обстановка сменилась аналогичным образом. Над Европой сформировался антициклон с центром над Германией, со вторичным центром над о. Мальта и повышенным атмосферным давлением над Апеннинским полуостровом. Эти изменения синоптических условий обеспечили быстрое увеличение нагрузок на геоблоки Центральной Европы и Италии (см. рис. 4). Более четко триггерный эффект влияния атмосферных процессов виден по результатам расчетов полей барических нагрузок, которые представлены на рис. 5. Из рисунка видно, что увеличение барических нагрузок к 26 октября наблюдалось в Центральной Европе и над Северной Африкой.

Над эпицентром землетрясения также располагается изолиния нулевой деформации. Эпицентр землетрясения отмечен звездой.

Проявление эндогенных процессов при подготовке землетрясений можно оценить по выделению литосферных газов. Следует подчеркнуть прогностические возможности геофизического мониторинга на примере эмиссии радона, временной ряд которого был любезно предоставлен итальянскими исследователями (рис. 6) [22]. Из рисунка видно, что максимальное значение эмиссии радона наблюдалось во второй половине 20 октября. Второй, менее значимый, максимум эмиссии радона наблюдался уже во второй половине 25 октября, что может служить хорошим прогностическим признаком. Но прогноз землетрясения на основании только измерений эмиссии радона сделан не был, поскольку максимумы наблюдаются часто, но землетрясений при этом не происходит. При синхронном анализе мониторинга атмосферных процессов и геофизических предвестников, таких как эмиссии радона, можно с большей достоверностью составлять краткосрочные прогнозы землетрясений [9]. Однако оперативные данные мониторинга геофизических измерений для сейсмоактивных регионов нам не доступны. Поэтому прогноз с достоверностью в 75 % был представлен для пользователей Интернета (рис. 7) [сайты: <https://www.facebook.com/groups/993136724082217/?pnref=lhc>, http://quake_vnb.rshu.ru].

Через четыре дня, 30 октября 2016 г., в 06 ч 40 мин гринвичского времени (координаты: $42^{\circ} 84'$ с. ш., $13^{\circ} 11'$ в. д.) в Центральной Италии произошло разрушительное землетрясение с $M = 6,7$. Данное землетрясение можно было бы отнести к афтершоку, но по энергии оно оказалось сильнее и координаты эпицентра несколько отличались. Поэтому данное сейсмическое событие следует принять, как сильное землетрясение.

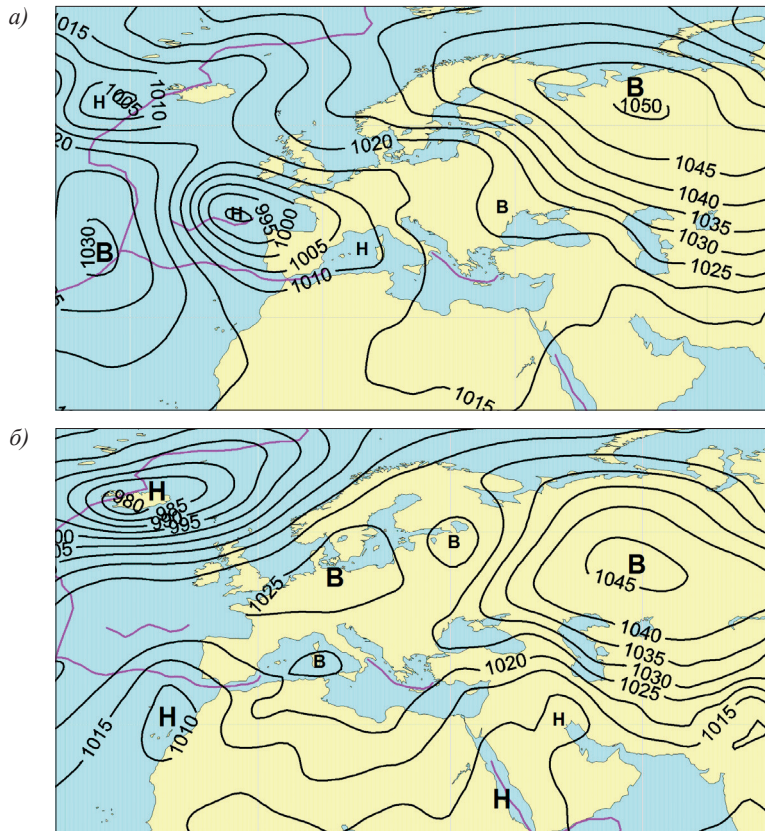


Рис. 4. Барические поля: а — 23 октября 2016 г.; б — 26 октября 2016 г.

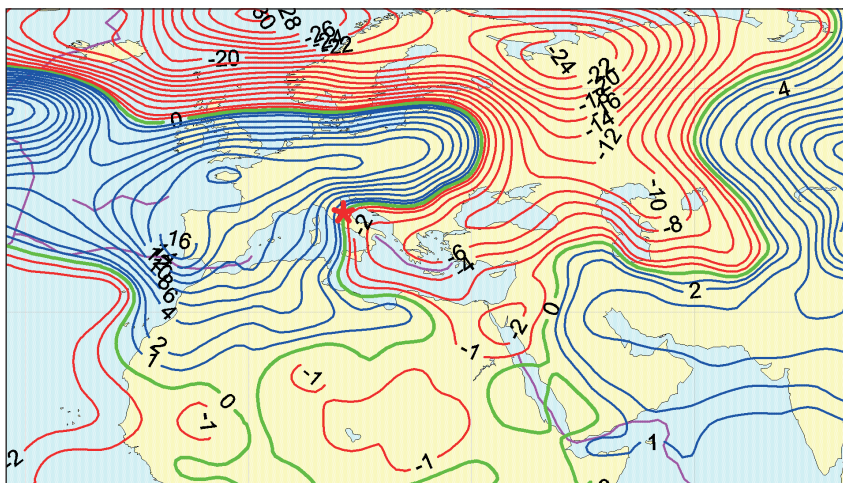


Рис. 5. Рассчитанное поле барических нагрузок на 26 октября 2016 г. с $M = 6,3$

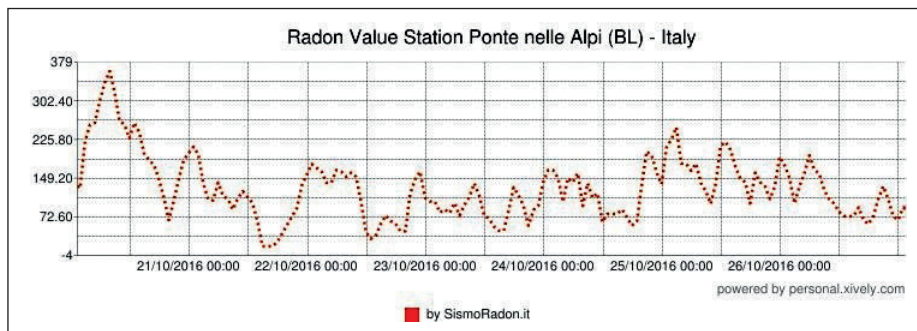


Рис. 6. Временной ряд эмиссии радона, предшествующий землетрясению 26 октября 2016 г., измеренный в центре Италии

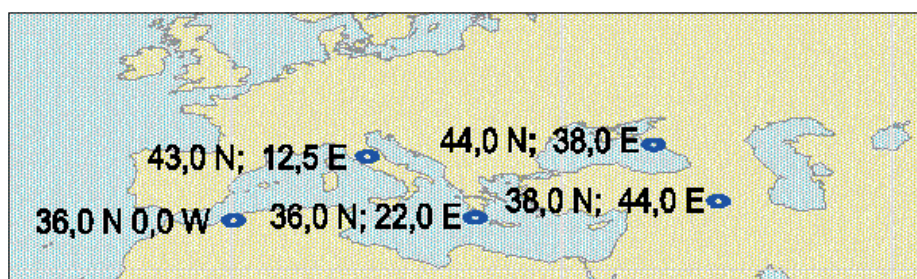


Рис. 7. Фрагмент краткосрочного прогноза землетрясений, составленного 24 октября на 26 октября 2016 г. и выставленного в Интернет

Анализ атмосферных процессов показал, что похожие атмосферные преобразования отмечались и при землетрясении 30 октября 2016 г.

В день землетрясения, как и в предыдущих случаях, синоптическая обстановка сменилась аналогичным образом. Над Европой сформировался антициклон с центром над Германией и повышенным атмосферным давлением над Апеннинским полуостровом (рис. 8). Изменения синоптических условий обеспечили быстрое увеличение нагрузок на геоблоки Центральной Европы и Италии (рис. 9). Из рисунка видно, что увеличение барических нагрузок к 30 октября наблюдалось в Центральной Европе и над Северной Африкой. Землетрясение 30 октября наступило раньше, чем землетрясение 26 октября. Расчеты проводились по данным за 12-часовой срок. Это отразилось на расположении изолинии нулевой деформацией, которая оказалась южнее эпицентра землетрясения (см. рис. 9). С учетом интерполяции по времени возникновения землетрясения изолиния нулевой деформацией расположилась над эпицентром.

Основываясь на АЦП для данного района Италии, расчетных данных барических нагрузок на 30 октября 2016 г. и их интерполяции, был составлен прогноз катастрофы, который был выставлен в Интернет (сайты: http://quake_vnb.rshu.ru/, <https://www.facebook.com/groups/993136724082217/?pnref=lhs>) и представлен на рис. 10.

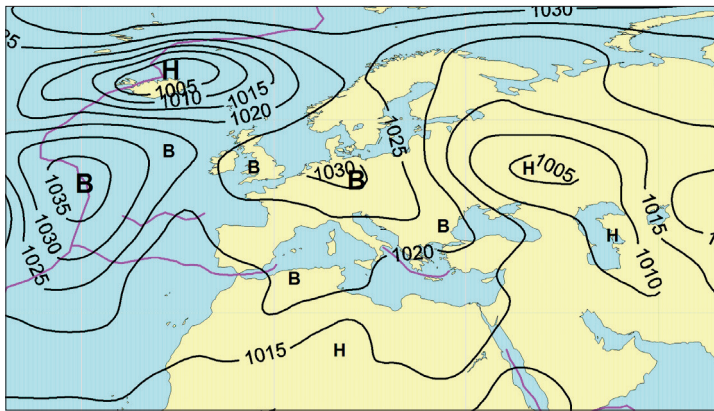


Рис. 8. Барические поля 30 октября 2016 г.

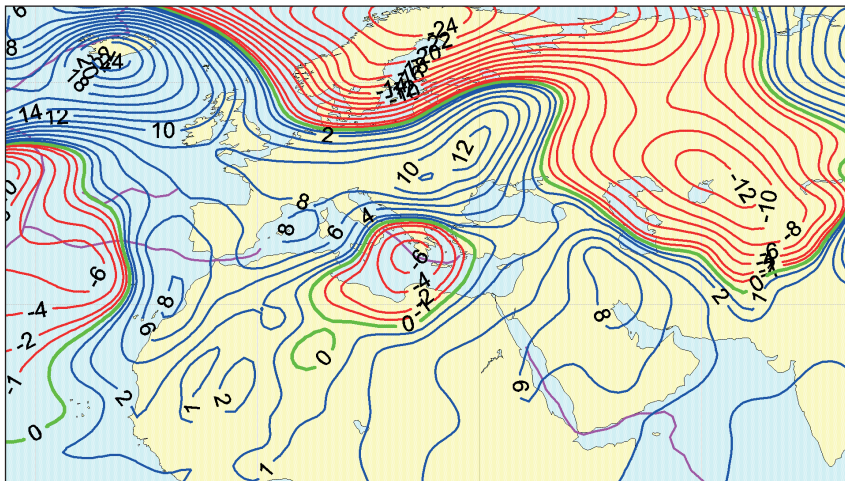


Рис. 9. Рассчитанное поле барических нагрузок на 30 октября 2016 г. с $M = 6,7$



Рис. 10. Фрагмент краткосрочного прогноза землетрясений, составленного 28 октября на 30 октября 2016 г. и выставленного в сеть Интернет

Заключение

Расчет времени формирования напряжений, необходимых для возникновения землетрясений с $M \geq 6$ [6], на основе теории тектонических движений составляет несколько десятков лет. В настоящее время роль тектонических деформаций в процессе подготовки землетрясений снижена, и основная роль отводится эндогенным и экзогенным процессам [7–10, 12, 15, 16]. За определенный период времени эндогенные процессы (физико-химические реакции и флюидные потоки в земной коре) подготавливают сейсмические события [14, 15], а быстрые изменения атмосферной циркуляции обуславливают дополнительные напряжения на земную кору и инициируют землетрясения различной силы [9, 10]. Подобные процессы происходят не только в Италии, но и во всех сейсмически активных районах Земли. Подчеркнем, что во всех трех представленных случаях изменения атмосферных процессов происходят достаточно быстро, т. е. в течение 2–3 суток, что резко воздействует на земную кору.

Расчеты изменения атмосферных нагрузок на земную кору в день, когда происходили землетрясения, показали одинаковый результат (см. рис. 3, 5, 9). За трое суток до землетрясений наблюдались повышенные барические нагрузки на геоблоки Северной Европы и пониженные барические нагрузки на геоблоки в районе Италии. В последующие трое суток синоптическая обстановка сменилась таким образом, что в районе Италии образовался гребень повышенного атмосферного давления, и это обеспечило быстрое увеличение нагрузок на геоблоки и возникновение землетрясений.

Выполненные исследования являются новым подходом к решению важнейшей задачи геофизики — краткосрочного прогноза землетрясений.

В целях достижения 95–100 % краткосрочных прогнозов землетрясений необходимо использовать АЦП и данные мониторинга геофизических предвестников в сейсмоактивных регионах Земли.

Литература

1. Александров С.И., Галкин И.Н., Гамбурцев А.Г., Олейник О.В. Особенности приливной сейсмичности Луны // Док. АН. 2000. Т. 372. № 2. — С. 236–239.
2. Боков В.Н. Качество метеорологических прогнозов — основа точности прогноза землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. 2006. № 2. — С. 229–239.
3. Боков В.Н. Межгодовая изменчивость сейсмичности и атмосферной циркуляции // Учен. зап. РГГМУ. 2008. № 6. — С. 139–147.
4. Боков В.Н. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Учен. зап. РГГМУ. 2010. № 14. — С. 89–100.
5. Боков В.Н. Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и Жизнь. 2011. № 9. — С. 47–57.
6. Боков В.Н., Гутцабаиш Е.Ш., Потиха Л.З. Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 18. — С. 173–184.
7. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Воздействие атмосферной циркуляции на наклоны земной поверхности // Учен. зап. РГГМУ. 2012. № 27. — С. 173–184.
8. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Изменчивость геоакустической эмиссии и изменения атмосферной циркуляции // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 32. — С. 43–55.
9. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Мониторинг геофизических предвестников и прогноз землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. 2014. № 36. — С. 128–138.

10. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Прогнозы сейсмических событий с использованием геофизических и атмосферных предвестников // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 44. — С. 141–148.
11. Гольдина С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физ. мезомеханика. 2008. № 11. — С. 5–13.
12. Гуфельд И.Л., Матвеева М.И., Новоселов О.Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных ковровых землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2011. Т. 2. № 4. — С. 378–315.
13. Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В. Некоторые особенности динамики межблокового деформирования в земной коре // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. — С. 669–683.
14. Кучай О.А. Особенности проявления сильных землетрясений в поле сейсмотектонических деформаций // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 3. — С. 285–296.
15. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. — М.: Наука, 2009. — 328 с.
16. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. — М.: Мир, 1979. — 388 с.
17. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. — М.: Наука, 2003. — 270 с.
18. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. — Л.: Гидрометеониздат, 1987. — 100 с.
19. Юрков Е.Ф., Гитис В.Г. О связи сейсмичности с фазами приливных волн // Физика Земли. 2005. № 4. — С. 4–15.
20. Lin C.H. Earthquake Clustering Relative to Lunar Phases in Taiwan // C.H. Lin, Y.H. Yeh, Y.I. Chen, J.Y. Liu, K.J. Chen, TAO, Vol. 14, No. 3, 1–10, September, 2003.
21. Reid H.F. The Mechanism of the Earthquake. The California Earthquake of April 18, 1906: Rep. of the State Investigation Commiss. Vol. 2. P.1. Washington, 1910, 56 p.
22. Данные мониторинга радона на станции Понте в Беллуно (Италия) [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.pontenellealpi.info/radon.php> (дата обращения 27.10.2016).