УДК 550.348.098.45:551.513

МОНИТОРИНГ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ И ТРИГГЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ОСНОВА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Бенкендорф О.В.[1], Боков В.Н.[1], Лебедев С.В.[1], Чебров Д.В.[2]

[1]Геофизический исследовательский центр «Градиент», г. Санкт-Петербург,
viktor.bokov333@gmail.com
[2] Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, chebr@emsd.ru

Введение

Известно, что предвестники для краткосрочного прогноза землетрясений (ЗТ) (заблаговременность за 2–3 суток) проявляются на далеких расстояниях от эпицентра землетрясений. При этом «процесс подготовки землетрясения охватывает большие площади, и начинается в краевых зонах, в то время как "центр" (область очага) молчит» [8]. Интерпретация подобных процессов сводится к трактовке усиления тектонических процессов, хотя достоверные данные об этом отсутствуют. С тектоническими процессами связывают и усиление деформации между геоблоками. Однако, кроме существенно медленных тектонических движений, существуют и другие физические силы, быстро влияющие на деформацию между геоблоками. Это гравитация и атмосферные процессы. Не рассматривая силы гравитации, которые достаточно хорошо отражены в многочисленных публикациях, кратко остановимся на атмосферных процессах.

Атмосферные процессы, приводящие к резким изменениям атмосферного давления, имеют протяженность в тысячи километров и охватывают большие площади и инициируют процесс подготовки ЗТ. Многолетние исследования позволили установить, что изменения физических условий в приповерхностном слое земной коры происходят под влиянием изменений атмосферного давления и изменений уровня водной поверхности [1–6]. В свою очередь неприливные изменения уровня водной поверхности, в основном, определяются атмосферной циркуляцией.

Анализ многочисленных случаев изменения атмосферной циркуляции, предшествующих сильным ЗТ, позволил установить триггерные эффекты, способствующие возникновению сейсмических событий [1, 2, 4]. Смещения сопряженных циклона и антициклона приводят к колебаниям земной коры и возникновению волн Лява [9]. Атмосферные триггерные эффекты обусловлены быстрой сменой атмосферных вихрей противоположного знака в районе активных разломов, что приводит к резкому росту тангенсальных напряжений на разломе и возникновению ЗТ [1]. Для прогноза сейсмических событий в работах был [1–6] предложено использовать атмосферно-циркуляционный предвестник ЗТ. Под атмосферно-циркуляционным предвестником (АЦП) для фиксированного роя эпицентров землетрясений 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 или зацепов к соскальзыванию [7, 8, 10]. Эту готовность горных пород к разрушению можно оценить по результатам мониторинга геофизических предвестников, которые проводятся КФ ФИЦ ЕГС РАН. На основе ретроспективного анализа 47 случаев мощных землетрясений проведены исследования оценки возможности использования измерения GPS, измерений литосферных газов (радона), уровня подземных вод с изменчиастью атмосферных процессов. Краткие результаты этих исследований представлены в данной статье.

Мониторинг и прогноз атмосферных триггеров

Поскольку сейсмологи и геофизики считают, что ЗТ возникают под влиянием триггерных эффектов [1, 10], то и методы прогноза должны быть основаны на учете выявленных триггеров. Следует подчеркнуть, что атмосферное давление влияет на деформацию земной коры, а деформационные процессы относят к первичным предвестникам. Другие, вторичные предвестники ЗТ не содержит прогностической составляющей, что практически исключает краткосрочный прогноз землетрясений. Однако мониторинг деформации земной поверхности, вызываемой сопряженными антициклонами, в интервале 1–4 суток достаточно надежен (около 85% оправдываемости) и содержит прогностическую составляющую, что позволяет составлять прогноз ЗТ с заблаговременностью за 2–3 суток.

Для каждого сейсмически активного района проведены исследования по выявлению АЦП характерные для данного района. Ежедневный мониторинг и анализ прогностических полей атмосферного давления позволяет произвести оценку формирования в атмосфере АЦП в последующие 3 суток. Анализируя и сопоставляя возникновение «прогностического» АЦП с характерным АЦП можно с определенной вероятностью ожидать возникновение ЗТ в том районе над которым формируется прогностический АЦП. Достоверность прогноза определяется качеством метеорологических полей и наличием данным геофизического мониторинга процессов земной коры. Сейсмо-синоптический метод краткосрочного прогноза [2, 6] надежен и апробирован на тысячах прогнозах землетрясений.

Совместный мониторинг атмосферных триггеров, геофизических предвестников и прогноз землетрясений

В целях оценки возможности использования геофизических измерений совместно с атмосферно-циркуляционным предвестником в целях усовершенствования краткосрочного прогноза проводился ретроспективный анализ связей АЦП с геофизическими измерениями на Камчатке. Рассматривалось 47 случаев ЗТ с $M \geq 5.5$. При этом значительная часть ретроспективных случаев представлена по Северным Курилам и Командорским (Алеутским) островам.

Расчеты и анализ атмосферных процессов, поиск АЦП выполнялся по архивным данным геофизического исследовательского центра «Градиент».

Наиболее полные данные мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН представил по измерения GPS и уровню подземных вод. Меньше данных измерений получено по радону. Поскольку АЦП определяется изменением полей, то и пункты измерений геофизических предвестников должны располагаться на обширном пространстве. Достоверную и качественную связь возможно получить при наличии хотя бы двух пунктов наблюдений [6]. Даже в масштабах Камчатки пункты измерений радона и уровня подземных вод можно соотнести к одной точке наблюдений. Поэтому результаты анализа связей АЦП с указанными геофизическими измерениями носят обобщенный и предварительный анализ.

Результаты исследований по данным мониторинга измерений GPS показали, что интенсивность и возникновение геофизических предвестников тесно связаны с триггерными процессами (АЦП) и степени готовности возникновения ЗТ. В качестве примера, на рис.1 приведены данные измерений для 5 станций GPS, которые «покрывают» почти всю Камчатку.

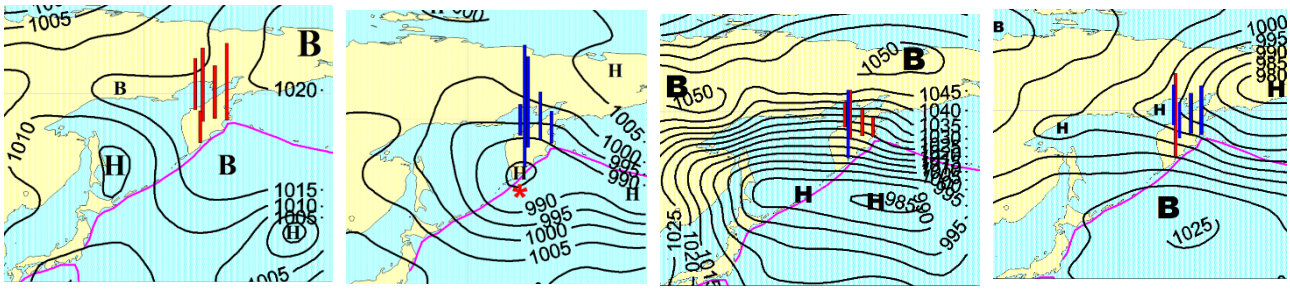


Рис. 1. Карты атмосферного давления (гПа) и данные вертикальной компоненты GPS измерений (столбики красного и синего цвета). Соответственно слева на право: карты за 07.09.2009 г., за 10.09.2009 г., за 11.09.2011 г., за 24.12.2010 г. Звездочкой отмечен эпицентр ЗТ. Где красного цвета понижение поверхности на 3 мм, синего цвета – повышение поверхности на 3 мм.

Сопоставление атмосферных процессов с данными GPS подтвердило связь барических нагрузок с изменениями уровня участков земной коры, что характеризует атмосферу как триггер. Так на рис.1 вертикальные компоненты GPS измерений показывают понижение дневной поверхности (красный цвет), что обусловлено высоким атмосферным давлением. В случае низкого атмосферного давления (рис.1) наблюдается повышение дневной поверхности (синий цвет).

Во всех 47 случаях за 5–7 суток перед ЗТ с $M \geq 5.5$ наблюдались слабые не структурированные изменения уровней дневной поверхности разного знака. За 2–3 суток до возникновения ЗТ наблюдались существенные пространственные, структурированные, быстрые изменения уровня дневной поверхности и значительное увеличение величины наклонов поверхности разного знака. Именно быстрые изменения знаков дневной поверхности с существенным увеличением величины наклонов являются критерием «готовности» горных пород к разрушению. При этом в атмосфере должен присутствовать АЦП, характерный для конкретного района Камчатки,

Командорских и Курильских островов. При наличии перечисленных условий вероятность возникновения ЗТ с $M \geq 5.5$ очень высока.

С целью достижения большей достоверности прогноза возможно использовать и другие, дополнительные геофизические предвестники, уточняющие вероятность возникновения сильного ЗТ. Например, были представлены данные уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5 (координаты 53.169°с.ш., 158.414°в.д.). Данные уровнемерных наблюдений состояли из 32 фрагментов часовых данных уровнемерных наблюдений длинной 10 суток, включающих 40 «сейсмических событий» за период с 07.09.2008 г. по 27.12.2017 г. При этом для всех временных рядов была выполнена компенсация бароваций и сглаживание с окном 48 часов. Анализ скомпенсированных и сглаженных указанных временных рядов не позволил выявить значимые и достоверные связи с АЦП.

Пункты наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН за подпочвенным радоном расположены на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне достаточно близко, что затрудняет выявление связей с АЦП. Однако общие закономерности выявлены во всех 13 случаях и определяются двумя атмосферными механизмами. В качестве примера рассмотрим оба механизма.

Землетрясение 24.07.2008 г. с $M = 6.1$ с координатами эпицентра 50.6°с.ш., 158.0°в.д. На рис. 2 представлены карты барических полей, предшествующих этому сейсмическому событию.

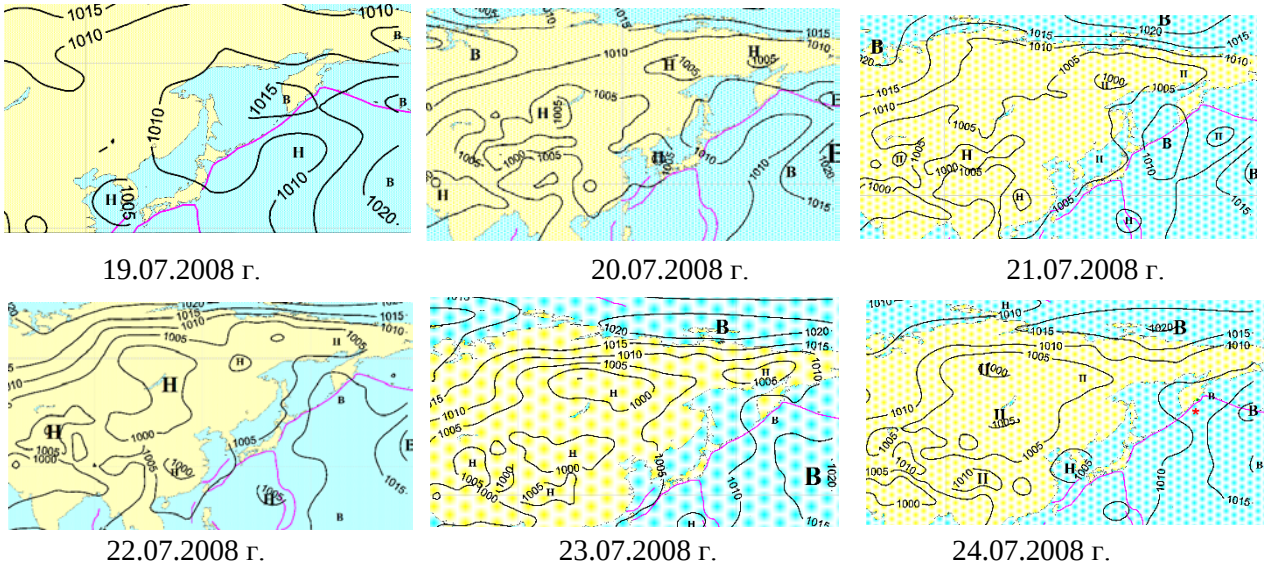


Рис. 2. Карты атмосферного давления (гПа) предшествующие землетрясению 24.07.2008 г.

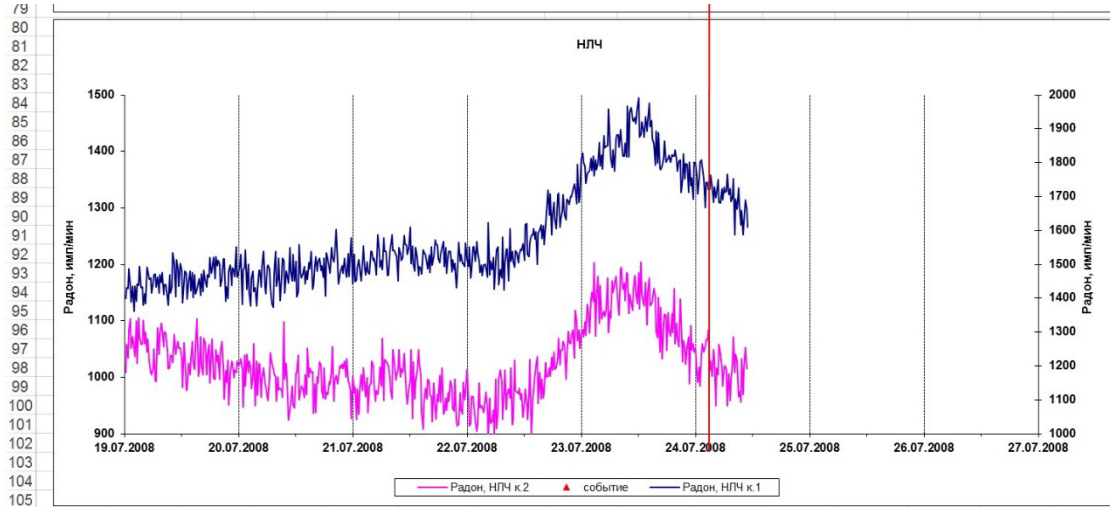
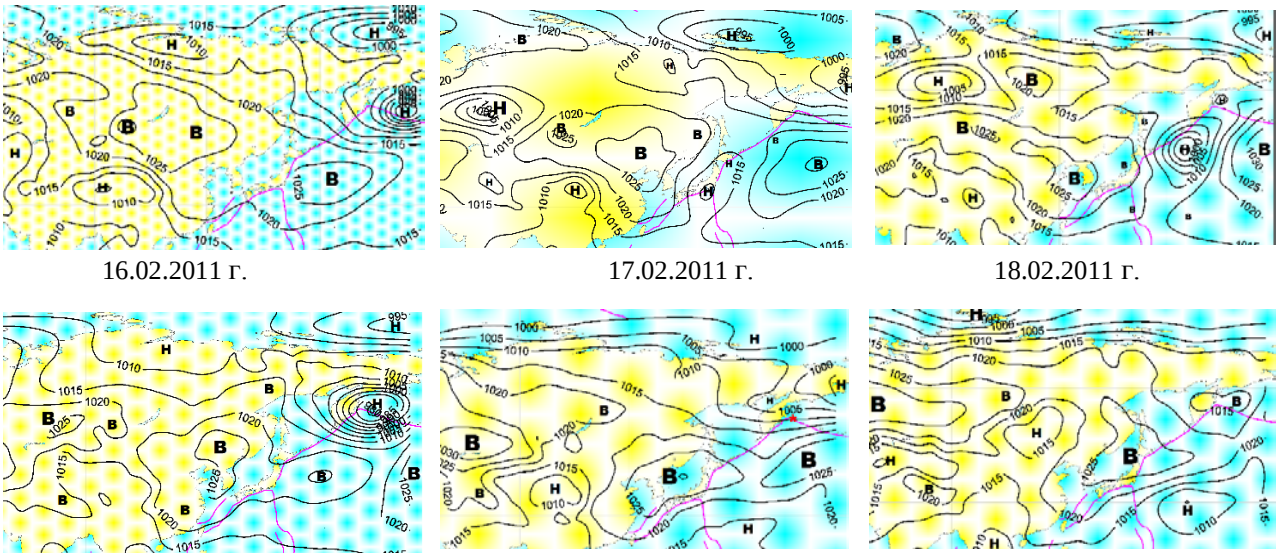


Рис. 3. Временной ход подпочвенного радона, измеренного в пункте ИЛЧ. Вертикальная линия – время ЗТ.

С 19 по 23 июня 2008 года в районе наблюдений радона наблюдалась зона слабо градиентных полей, что не приводило к увеличению эмиссии радона в атмосферу (рис. 2, рис. 3). С середины 23 июня над Чукотским морем образовался мощный антициклон, над северным побережьем Охотского моря циклон, а над южной частью Камчатки усилился гребень высокого давления за счет роста

антициклона над акваторией Тихого океана. Сложившая синоптическая ситуация что привело к росту напряжений в земной коре и к увеличению эмиссии радона в атмосферу. В день возникновения ЗТ циклон над северным побережьем Охотского моря заполнился, что привело к увеличению положительных нагрузок на земную кору и к «запиранию» трещин для эмиссии радона в атмосферу (рис. 2, рис. 3).

Другой механизм представлен для ЗТ 20.02.2011 г. с $M = 6.2$ с координатами эпицентра 55.7°с.ш., 162.4°в.д. На рис. 4 представлены карты барических полей, предшествующих этому сейсмическому событию.



16.02.2011 г. 17.02.2011 г. 18.02.2011 г.

19.02.2011 г. 20.02.2011 г. 21.02.2011 г.

Рис. 4. Карты атмосферного давления (гПа) предшествующие землетрясению 20.02.2011 г.

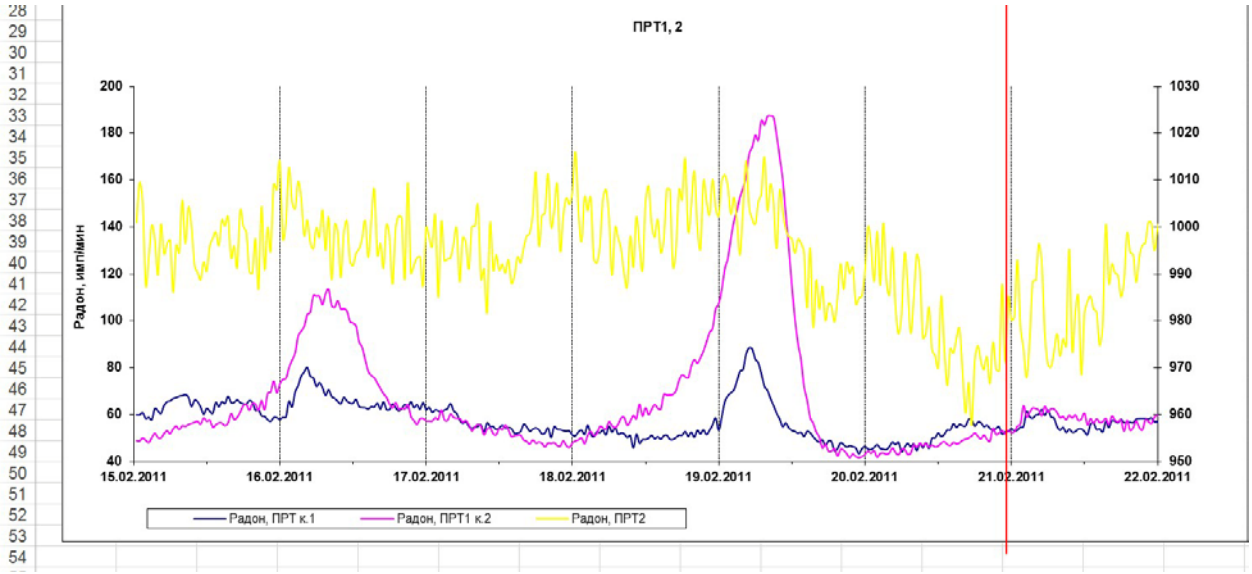


Рис. 5. Временной ход подпочвенного радона, измеренного в пункте ПРТ. Вертикальная линия – время ЗТ.

15 февраля над Камчаткой отмечалась область повышенного атмосферного давления, что обусловило низкий уровень эмиссии радона в атмосферу (рис. 4, рис. 5). С 16 февраля синоптическая ситуация изменилась. Наблюдались два циклона: первый с центром над Чукотским морем и второй с центром над Командорскими островами. Это привело к уменьшению барических нагрузок на земную кору и к увеличению интенсивности эмиссии радона в атмосферу. 17 февраля циклон с центром над

Командорскими островами сместился в Берингово море, а над Камчаткой отмечалась область повышенного атмосферного давления, что обусловило низкий уровень эмиссии радона в атмосферу. В первой половине 18 февраля над Камчаткой отмечалась область среднего атмосферного давления, что сохранило низкий уровень эмиссии радона в атмосферу. Во второй половине 18 февраля к Камчатке подошел мощный циклон, который господствовал над Камчаткой и 19 февраля, что привело к увеличению интенсивности эмиссии радона в атмосферу. В дальнейшем, 20 февраля атмосферное давление стало расти, что привело к уменьшению интенсивности эмиссии радона в атмосферу. В ночь на 21 февраля давление продолжало расти, что привело к сглаживанию положительных нагрузок на земную кору и к «запиранию» трещин для эмиссии радона в атмосферу (рис. 4, рис. 5). Поэтому эмиссия радона в атмосферу осталась низкой и вследствие резкого роста атмосферного давления произошло ЗТ. Следует подчеркнуть, что увеличение атмосферного давления на 1 мм.р.ст. соответствует увеличение давления на 1 км^2 на 13.6 миллиона килограмм. Также во всех случаях перед ЗТ и АЦП наблюдалось увеличение эмиссии радона в атмосферу.

Заключение

В результате мониторинга атмосферных полей уверенно выявляются АЦП, которые инициируют ЗТ и с достоверностью около 75% позволяют определить время (дату), место эпицентра (координаты) и силу ЗТ. Чтобы не допустить ложных тревог ЗТ необходимо «чувствовать» готовность земных недр к катастрофам. Для этой цели следует использовать ряд геофизических предвестников ЗТ. Также геофизические предвестники ЗТ способны увеличивать свою интенсивность при «готовности» зацепов в разломах к соскальзыванию 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.

Поэтому без совместного использования атмосферно -циркуляционных предвестников и геофизических предвестников получить более точные краткосрочные прогнозы ЗТ не удастся, о чем свидетельствуют многолетние сейсмологические разработки и метеорологические исследования [1–6]. Чтобы решить задачу краткосрочного прогноза ЗТ необходимы совместные исследовательские и оперативные работы метеорологов, геофизиков и сейсмологов.

Список литературы

1. *Боков В.Н, Гутшабаш Е.Ш., Потиха Л.З.* Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С. 173–184.

2. *Боков В.Н.* Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и жизнь. 2011. № 9. С. 49–59.

3. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Мониторинг геофизических предвестников и прогноз землетрясений // РГГМУ. Ученые записки. 2014. № 36. С. 128–138.

4. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Инициирование «быстрых» землетрясений атмосферным триггером // РГГМУ. Ученые записки. 2017. № 47. С. 56–66.

5. *Боков В.Н., Лебедев С.В.* Экзогенные процессы и сейсмичность // Триггерные эффекты в геосистемах, Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием (г. Москва. 6–9 июня 2017), 2017 г.), Ин-т динамики геосфер РАН; под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2017. С. 379–386.

6. *Боков В.Н.* Возможности метеорологии в управлении сейсмическими рисками // РГГМУ. Ученые записки. 2019. № 55. С. 160–174.

7. *Завьялов А.Д.* Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.

8. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.

9. *Сидоренков Н.С.* Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Наука, 2001. 375 с.

10. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.