

УДК 550.34:551.513

АТМОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ИНИЦИИРУЮЩИЕ МЕХАНИЗМ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В.Н. Боков, В.Н. Воробьев

Российский государственный гидрометеорологический университет, vnv@rshu.ru

Представлены предварительные результаты исследований влияния экзогенных процессов (изменения атмосферной циркуляции) на инициирование механизма очага землетрясений для случаев взброса и сброса. Выявлено, что атмосферная циркуляция инициирует тип механизма очага землетрясения (взброс или сброс). Тип подвижки в очаге зависит от пространственного расположения циклонов и антициклонов.

Ключевые слова: приповерхностная геофизика, изменения атмосферной циркуляции, механизм очага землетрясения, типы подвижек: сдвиг, взброс, сброс.

ATMOSPHERIC PROCESSES INITIATING THE FOCAL MECHANISM OF EARTHQUAKES

V.N. Bokov, V.N. Vorobyev

Russian State Hydrometeorological University

The preliminary results of studies of the influence of exogenous processes (changes in atmospheric circulation) on the initiation of the focal mechanism of earthquakes, for cases of overlap fold and fault are presented. It is revealed that atmospheric circulation initiates the type of focal mechanism of earthquakes (overlap fold and fault). The type of movement in the hearth depends on the spatial arrangement of cyclones and anticyclones.

Keywords: near-surface Geophysics, changes in atmospheric circulation, focal mechanism of earthquakes, types of slips: offset, overlap fold and fault.

Введение

В последние годы в геофизике получило распространение такое понятие, как приповерхностная геофизика. Приповерхностная геофизика рассматривает вариации геофизических полей, важных для среды обитания человека, а также служит основой для разработки новых подходов и методов диагностики геодинамического состояния приповерхностных участков земной коры, где развивается вся деятельность человека [1].

Атмосфера Земли оказывает основное внешнее воздействие, определяющее поверхностные процессы в земной коре, и поэтому является главным «дирижером» приповерхностной геофизики. Вариации полей сейсмических колебаний, эманационное поле природного радона и ряд других геофизических полей разной природы на поверхности Земли тесно связаны с изменчивостью атмосферных процессов [6—9, 17, 18, 27].

Поскольку влияние изменчивости атмосферных процессов на сейсмичность проявляется во всех диапазонах временной изменчивости [3, 4], то, естественно, возникает вопрос о возможности влияния изменений атмосферных процессов на механизм возникновения очага землетрясений. До сих пор считалось, что механизм возникновения очага землетрясений связан только с тектоническими [13, 15, 19—21, 23, 24] и эндогенными [14, 25] процессами. Данные о механизме очагов землетрясений составляют практически основную часть информации о напряженном состоянии земных недр. Механизм возбуждения сейсмических волн очагом землетрясения связывают с внезапной подвижкой горных пород по поверхности ослабленной прочности. Однако причины появления внезапной подвижки горных пород до сих пор полностью не исследованы. Считается, что «тектонические» разрывы на поверхности Земли бывают трех типов: сдвиговые, взбросовые и сбросовые [19]. Соответствующие этим движениям механизмы очага землетрясений называются сдвигами, взбросами или сбросами [19]. Сейсмологи по-прежнему не могут понять, какие природные явления обуславливают различные типы движения — сдвиги, взбросы и сбросы, возникающие на линии одного разлома.

Исследования по выявлению механизма возникновения землетрясений ведутся уже не один десяток лет. Эти исследования основываются, прежде всего, на теории сплошных сред и механики разрушений, что, в общем, позволяет оценить механизм разрушения пород в момент возникновения землетрясений. Однако в качестве физических явлений, обуславливающих подготовку землетрясений, рассматривают только тектонические и эндогенные процессы. Роль экзогенных процессов исследована очень слабо. В настоящей работе представлены предварительные результаты влияния экзогенных процессов (изменения атмосферной циркуляции) на инициирование механизма очага землетрясений.

Воздействие атмосферой циркуляции на механизм очага землетрясений

Теоретически считается, что в исходном состоянии среда (земная кора) находится под однородной нагрузкой и в некоторый момент времени в эпицентре зарождается плоская сдвиговая трещина (дизъюнкция).

Напряжения (сейчас считаются только тектоническими) в очагах землетрясений реконструируются по определениям механизмов очагов (фокальных механизмов). Для этого используются данные действующих в регионе сейсмических станций [19]. Механизм очага отражает одновременно ориентацию плоскости разрыва в очаге и направление относительного смещения сторон разрыва, т.е. механизм есть кинематика движения в очаге. Механизм очага описывает неупругие деформации, возникающие в области очага землетрясения (подвижку) и генерирующие упругие сейсмические волны. Сейсмологами предложена точечная модель очага в виде двойного диполя по данным сейсмических записей [19]. В схематичном виде эта модель отражена на рис. 1. Квадрантное распределение знаков первых вступлений продольных Р-волн наблюдается в преобладающем числе землетрясений и указывает на то, что землетрясения взрывного типа редки и разрядка энергии сопровождается уменьшением сдвиговых напряжений.

Принято представлять типы движения механизма очага землетрясений в виде стереограмм, соответствующих сдвигам, взбросам или сбросам (рис. 2) [19].

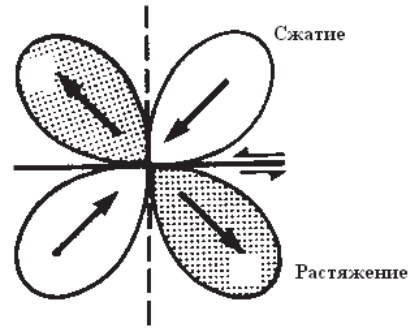
Использование стереограмм при картировании сейсмических событий позволяет наглядно оценить тип фокальных механизмов землетрясений, произошедших на данной территории за определенный период времени. В качестве примера на рис. 3 приведена карта очагов землетрясений со стереограммами, характеризующими тип подвижек [15]. Анализ стереограмм показывает, что практически в одной точке могут образовываться различные типы подвижек.

По каким же причинам в одной и той же точке сейсмоактивной зоны образуются различные типы подвижек? Существующие теории и модели очага землетрясений [13, 15, 19—21, 23, 24] не раскрывают причины возникновения того или иного типа механизма землетрясений, не объясняют их локальности.

Не рассматривая физические аспекты потери устойчивости развития локализованной ослабленной зоны в очаге землетрясения (это достаточно подробно исследовано в работах геомехаников [13, 20, 24, 26]), остановимся на идее влияния атмосферных процессов как причины механизма формирования очага землетрясения.

Если рассматривать не только эндогенные и тектонические процессы, которые влияют на изменения на поверхности земной коры, но и экзогенные процессы (атмосферную циркуляцию), то причины появления различных типов подвижек становится объяснимым.

Исследования показали, что напряжения противоположного знака, вызванные атмосферными вихрями, усиливают напряжения в земной коре в зависимости от пространственной неоднородности пород, глубинного реологического распределения земной коры, наличия пространственной структуры разломов и геоблоков, обуславливающих определенные свойства земной коры, характерные только для данной местности [2, 5]. Свойства земной коры приводят к тому, что в конкретной точке землетрясения возникают только при характерной изменчивости атмосферного давления на обширной территории Земли и формировании так называемого атмосферно-циркуляционного предвестника (АЦП) [8]. Многолетние исследования и опытные краткосрочные прогнозы показали, что именно изменения атмосферных процессов и



P-волны

Рис. 1. Модель очага сейсмического явления.



Рис. 2. Стереогаммы, соответствующие очагам сейсмического явления.

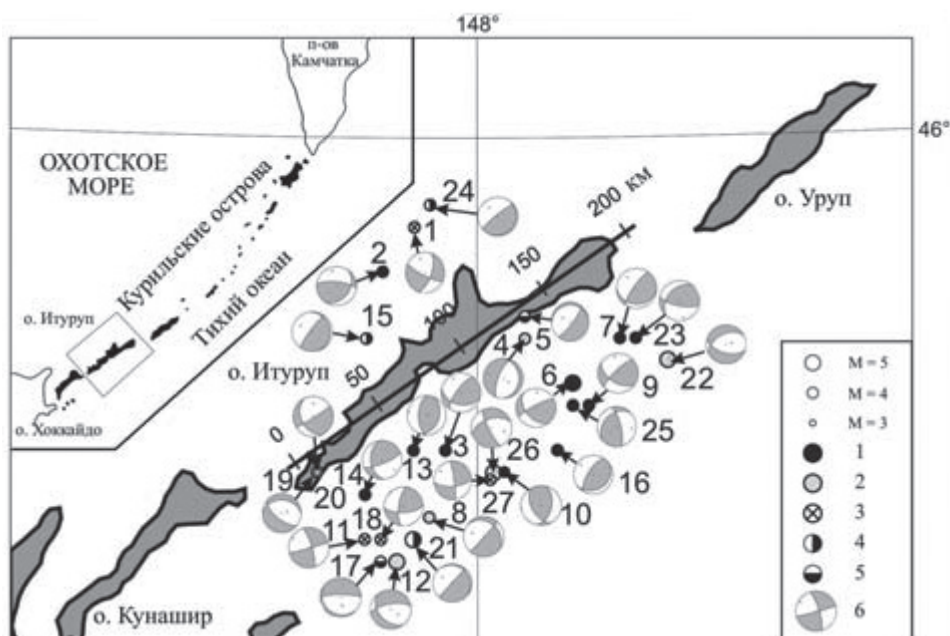


Рис. 3. Очаги землетрясений с магнитудой $M = 3 \dots 5$ в районе исследований в 2000—2009 гг.

Типы подвижек: 1 — взбросы, 2 — сбросы, 3 — сдвиги, 4 — надвиги, 5 — поддвиги; 6 — стереограмма фокальных механизмов очагов землетрясений.

появление АЦП для определенного сейсмоактивного района являются триггером возникновения землетрясений [5, 8].

Накопленный опыт по изучению современных движений земной коры в горнодобывающих районах позволил установить, что наступлению внезапного выброса, горного удара, так же как и землетрясения, предшествует деформация земной поверхности над горным массивом. Следовательно, высокий уровень естественного поля напряжений земной коры является необходимым, но недостаточным фактором для возникновения землетрясений [16]. Деформация земной поверхности, которая предшествует появлению сейсмических событий, происходит в результате изменения атмосферных процессов. В реальности среда постоянно испытывает быстрые напряжения и деформации под влиянием смещающихся циклонов и антициклонов [5, 8] и медленные (кумулятивные) деформации вследствие процессов дегазации коры [14] и тектонических движений [23].

Существуют различные представления о деформациях, вызываемых циклонами или антициклонами [5, 12, 29]. Величина этих деформаций оценивается для модели в виде круга радиусом R с избыточным атмосферным давлением p_0 (антициклон). На границе круга избыточное давление приближается к нулю. С границей круга с избыточным давлением, как правило, соприкасается граница другого круга (циклон) с недостаточным давлением (ниже среднего).

Значения горизонтальной деформации, вызывающей растяжение площади, занятой атмосферным вихрем, в два-три раза меньше значений вертикальной деформации [12]. В частных случаях, используя свойства эллиптических интегралов, можно оценить значения деформаций с учетом значений модуля сдвига $\mu = 35 \cdot 10^9$ Па и значений коэффициента Пуассона $\sigma = 0,25$. При превышении атмосферного давления p_0 на $1,3 \cdot 10^3$ Па (10 мм рт.ст.) получены значения вертикальных смещений: для центральной части атмосферного вихря $w(0) = 1,43$ см; для границы атмосферного вихря $w(R) = 0,91$ см [12]. Для случаев мощных землетрясений перепады давления могут достигать $p_0 = 9,6 \cdot 10^3$ (имеется в виду перепад давления между двумя центрами сопряженных атмосферных вихрей). Радиус атмосферных вихрей, сопутствующих появлению мощных землетрясений, достигает 1000 км и более. Поэтому для мощных землетрясений вертикальные смещения могут достигать более высоких значений: $w(0) \approx 5,0$ см, $w(R) \approx 3,0$ см.

В обычных атмосферных условиях циклон является сопряженным с антициклоном. На площади, занимаемой циклоном, происходит «приподняtie» поверхности земной коры — подобные явления наблюдаются перед землетрясениями [6, 22]. Обратный эффект — пригибание поверхности земной коры — происходит на площади, занимаемой антициклоном [6, 22]. При смещении границы сопряженных циклонического и антициклонического полей и появления ее над активным разломом возникает напряжение, связанное с разностью наклонов земной поверхности, с последующим возникновением дополнительных тангенциальных составляющих напряжений с разных сторон разлома геоблоков [5, 21]. Этот процесс инициирует деформацию и дизъюнкцию с последующим соскальзыванием зацепов в разломе, что приводит к формированию сейсмических толчков.

Механизм очага начинается с образования дизъюнкции, которая формируется под воздействием триггерного эффекта АЦП, и дальнейшее развитие очага зависит от реологических свойств коры в данном месте и наличия разломов. В случае совпадения в пространстве ориентации вновь образованной дизъюнкции с основным разломом землетрясение будет сильным — это заключение основывается на данных анализа [10, 26]. Однако при другом расположении возникшей дизъюнкции относительно разлома можно предполагать уменьшение магнитуды землетрясения.

Результаты расчетов воздействия атмосферой циркуляции на механизм очага землетрясений

Используя данные о механизме очагов умеренных землетрясений, опубликованные в работе [15], а также данные о механизмах очагов мощных землетрясений, приведенные на сайте Национального сейсмологического центра США [30], авторы настоящей работы провели ряд расчетов, показавших существенное влияние атмосферных процессов на механизм очагов взброса и сброса.

В качестве примера рассмотрим случай с рассчитанным по сейсмическим данным механизмом очага — взбросом [15]. В упрощенном виде изменения барических нагрузок на земную кору [6, 7] представлены на двух картах. На рис. 4

представлено барическое поле за 25 февраля 2004 г., а на рис. 5 — за 28 февраля 2004 г., день сейсмического события с $M = 4,8$ (44,9° с.ш., 148, 6° в.д.). Из рис. 4 видно, что над Курилами наблюдалась обширная депрессия (Н), а на севере (северная часть Восточной Сибири) и юге (центральная часть Тихого океана) — мощные антициклоны (В). Такая атмосферная циркуляция обеспечила повышение нагрузок на геоблоки в северной и южной частях рассматриваемой территории (знак +) и их уменьшение над Курилами (знак –). При таком пространственном расположении пониженной атмосферной нагрузки в районе эпицентра происходит приподнятия земной коры, значения которого представлены выше.

В день возникновения землетрясения (см. рис. 5) произошел резкий рост атмосферного давления и в районе эпицентра земная кора прогнулась, что привело к сжатию пород в зоне разлома и как следствие к взбросу. Следует отметить, что высокое атмосферное давление реализует силу сжатия на земную кору за счет увеличения высоты уровня моря в районе эпицентра землетрясения. Сопоставив рис. 5 и 1, можно представить себе схему модели очага сейсмического явления с пространственным расположением атмосферных вихрей противоположного знака.

Такое соответствие схемы модели очага сейсмического явления преобразованиям атмосферных процессов указывает на физическое воздействие воздушных масс и инициирование механизма очага землетрясений. Подобные изменения атмосферной циркуляции наблюдаются и в случае мощных землетрясений в других регионах земного шара.

Например, на рис. 6 и 7 представлены барические поля, соответствующие атмосферным процессам, инициировавшим 10 октября 1980 г. мощное землетрясение в Алжире с $M = 7,3$ (36,19° с.ш., 1,35° в.д.). В данном случае атмосферные процессы меняются еще быстрее, а атмосферные вихри более мощные и занимают еще более обширные пространства. Здесь также отчетливо проявляется соответствие схемы модели очага сейсмического явления (см. рис. 1) пространственному расположению атмосферных вихрей противоположного знака. Еще за сутки до этого, 9 октября, над эпицентром землетрясения наблюдалась область пониженных атмосферных нагрузок (см. рис. 6), т.е. барическая ложбина.

На следующие сутки над эпицентром землетрясения (отмечен звездочкой) образовался барический гребень (рис. 7). Процесс атмосферных преобразований аналогичен процессу, который происходил на Курильских островах. Всего за одни сутки в районе эпицентра под влиянием барической ложбины произошло приподнятия земной коры. В день возникновения землетрясения наблюдался резкий рост атмосферного давления, и в районе эпицентра земная кора «прогнулась», что привело к сжатию пород в зоне разлома и вследствие этого к взбросу.

В настоящей статье приведены лишь два случая из 17 сейсмических событий, которые рассматривались при исследовании механизма взброса. Анализ и расчеты с учетом сезонной изменчивости всех рассмотренных случаев показали соответствие схемы модели очага сейсмического явления пространственному расположению и преобразованию сопряженных атмосферных вихрей противоположного знака для подвижек взбросового типа.

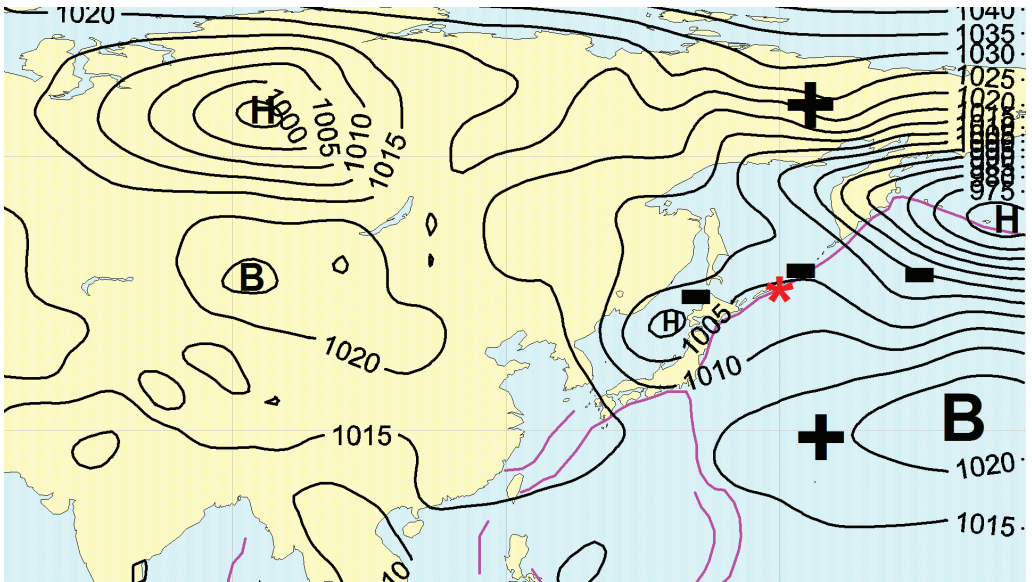


Рис. 4. Поле атмосферного давления за 25 февраля 2004 г.

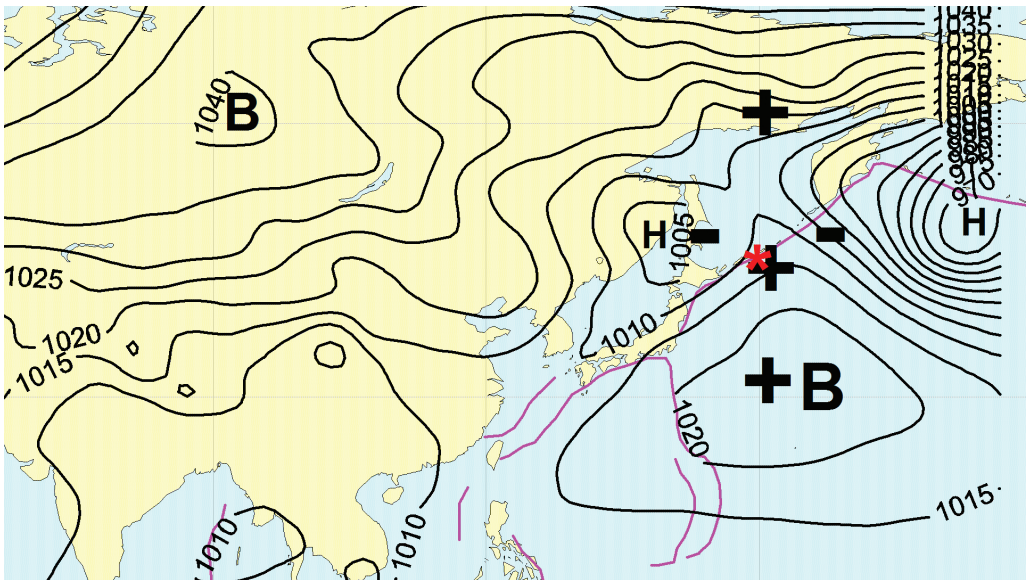


Рис. 5. Поле атмосферного давления за 28 февраля 2004 г. Механизм взброса.

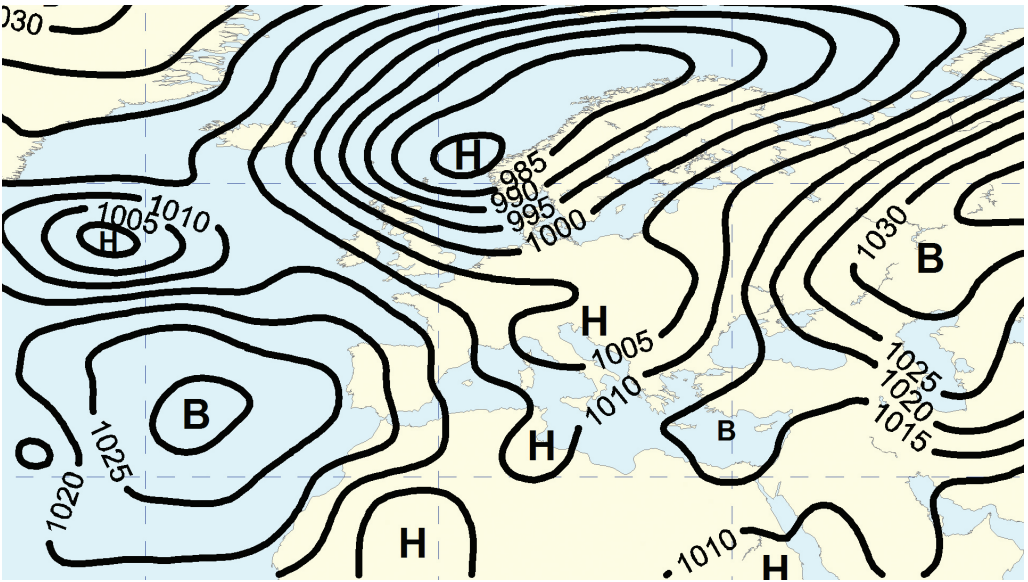


Рис. 6. Поле атмосферного давления за 9 октября 1980 г.

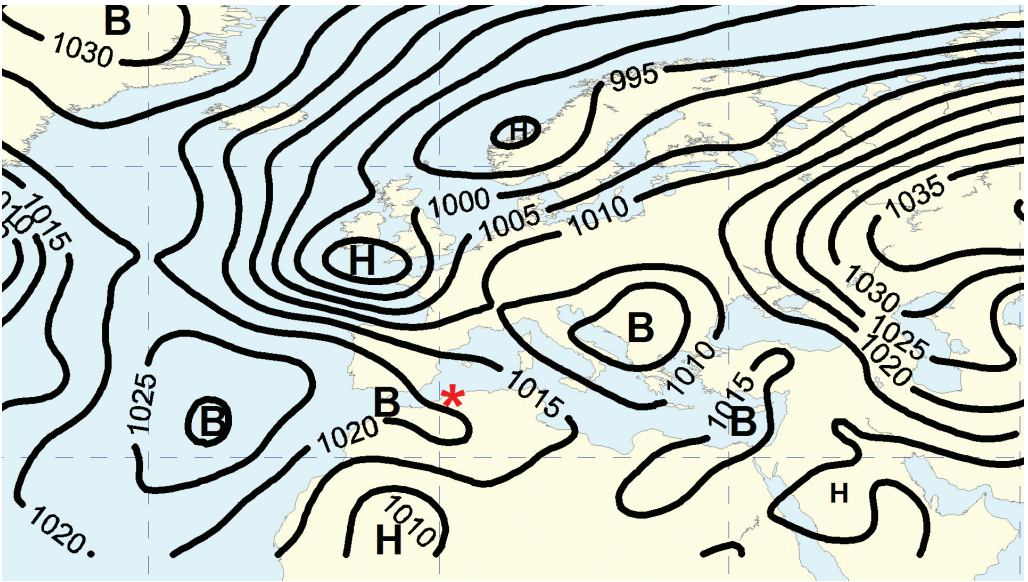


Рис. 7. Поле атмосферного давления за 10 октября 1980 г. Механизм взброса.

В случае механизма очага сейсмического явления с подвижкой сбросового типа наблюдаются противоположные атмосферные преобразования и, соответственно, противоположное воздействие на земную кору по сравнению с механизмом типа взброса.

В качестве примера рассмотрим случай с рассчитанным механизмом очага-сброса [15]. На рис. 8 представлено барическое поле за 10 ноября 2007 г., а на рис. 9 — за 13 ноября 2007 г., когда произошло сейсмическое событие с $M = 4,2$ ($44,5^\circ$ с.ш., $147,4^\circ$ в.д.). Из рисунков видно, что 10 ноября 2007 г. над Курилами наблюдался мощный антициклон, а над Чукоткой — обширная депрессия; циклоны также наблюдались над центральной Японией и северной акваторией Тихого океана. Такая атмосферная циркуляция обеспечила повышение барических нагрузок над Курилами и снижение барических нагрузок на геоблоки в северной и южной частях рассматриваемой территории. В день землетрясения (см. рис. 9) произошла смена атмосферных вихрей (область высокого атмосферного давления сменилась областью низкого давления). В рассматриваемом случае высокое атмосферное давление в районе эпицентра в течение двух дней «прогибало» земную кору, и быстрая — в течение суток — смена на низкое атмосферное давление способствовала приподнятию и растяжению коры в зоне разлома с последующим механизмом сброса. Анализ карт показывает, что механизм очага сейсмического явления и для случаев сброса также характеризуется двойным диполем, но с противоположным знаком. Образующаяся в результате атмосферных преобразований деформация земной коры приводит к разности наклона земной коры до 8—10 см.

Рассмотрим второй случай — мощное землетрясение, произошедшее в Турции 28 марта 1970 г. с $M = 7,1$ ($39,1^\circ$ с.ш., $29,6^\circ$ в.д.). Процесс изменения барических полей аналогичен рассмотренному выше первому случаю, хотя пространственное расположение атмосферных вихрей другое. 26 марта, за трое суток до сейсмического события, над районом эпицентра землетрясения (рис. 10) располагался барический гребень. Пространственное расположение областей высокого и низкого атмосферного давления также представляет собой двойной диполь с областями растяжения над северо-западной частью Африки и Норвежским морем и наличием барической ложбины над Центральной Европой. Области сжатия находятся над Западной Европой и восточными районами Африки и Азии (Турция, Туркменистан). Такая атмосферная циркуляция обеспечила повышение барической нагрузки над Турцией и в областях с высоким давлением и понижение барической нагрузки на геоблоки в областях с низким давлением. 28 марта, в день землетрясения (рис. 11), произошла смена атмосферных вихрей (область высокого атмосферного давления сменилась областью низкого давления). В рассматриваемом случае высокое атмосферное давление в районе эпицентра в течение двух дней «прогибало» земную кору, но быстрая, в течении суток, смена атмосферного давления на низкое способствовала приподнятию и растяжению коры в зоне разлома. Быстрое увеличение сил растяжения привело к образованию землетрясения с механизмом сброса.

Приведенные результаты показывают существенное влияние экзогенных процессов (атмосферной циркуляции) на сейсмичность. Именно атмосферная

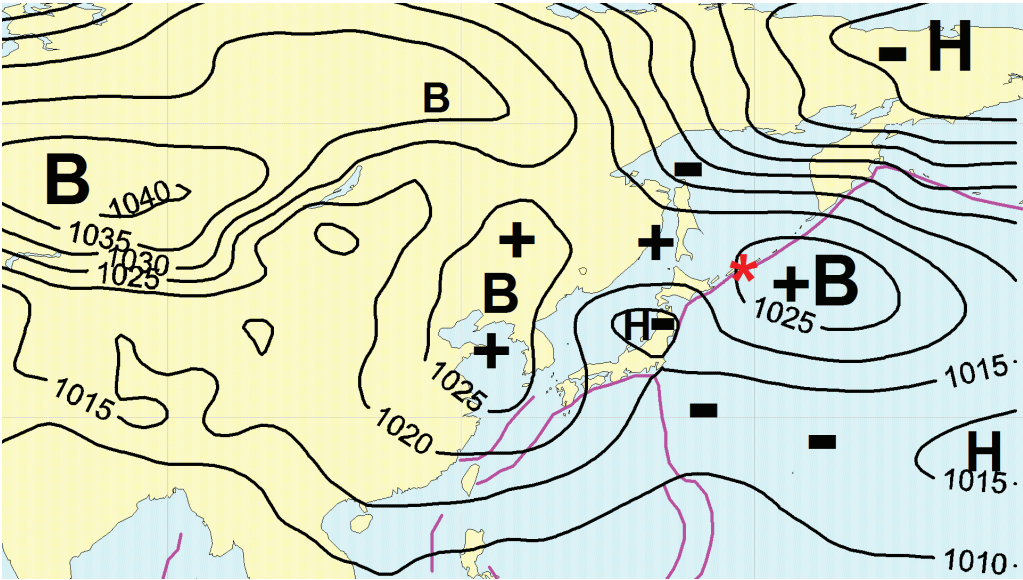


Рис. 8. Поле атмосферного давления за 10 ноября 2007 г.

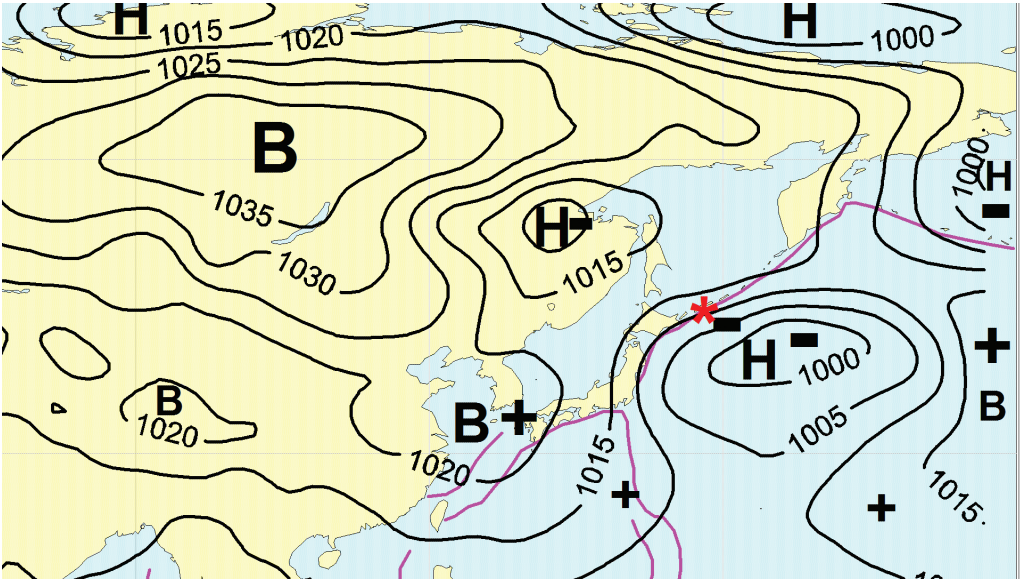


Рис. 9. Поле атмосферного давления за 13 ноября 2007 г. Механизм сброса.

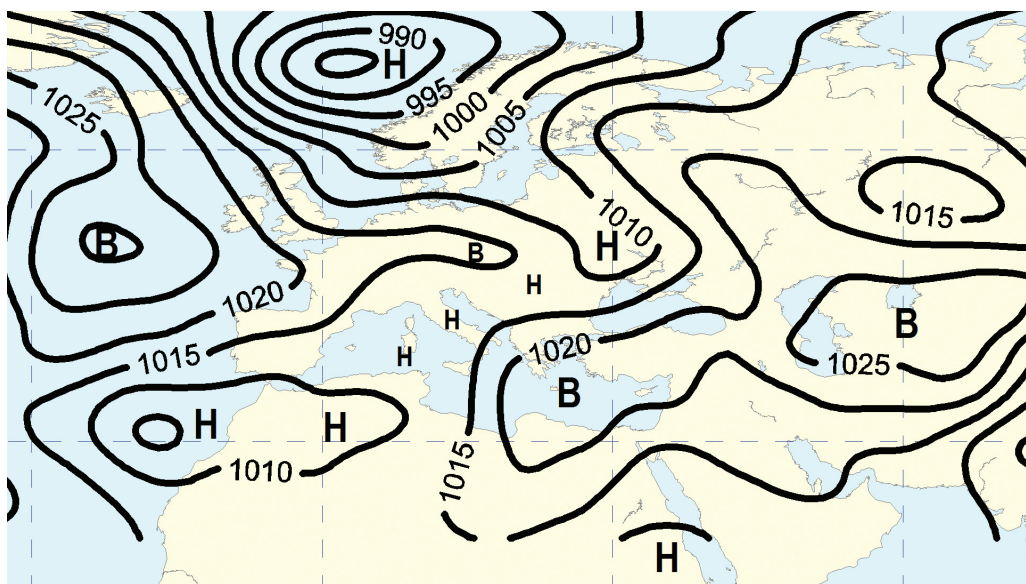


Рис. 10. Поле атмосферного давления за 26 марта 1970 г.

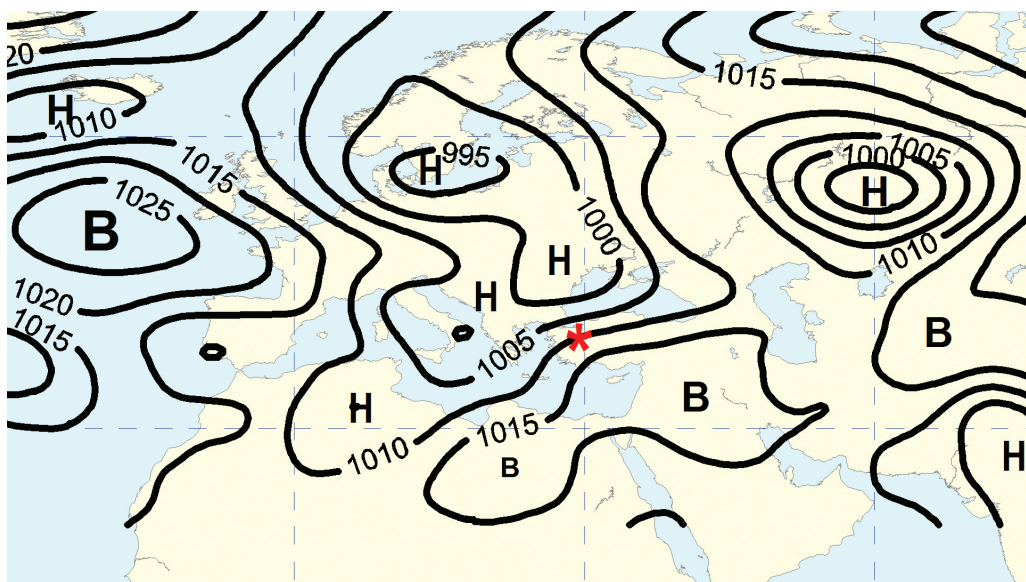


Рис. 11. Поле атмосферного давления за 28 марта 1970 г. Механизм сброса.

циркуляция инициирует тип механизма очага (взброс, сброс) землетрясения. Дальнейшее развитие очага землетрясений (простираание и падение двух нодальных плоскостей, направление подвижки вдоль них и т.д.) будет зависеть от величины накопленных напряжений, морфологии земной коры данного района и расположения разлома.

Заключение

Выполненные в последние годы исследования по влиянию изменения атмосферной циркуляции на сейсмичность представляют собой совершенно новый подход в оценке триггерных эффектов на земную кору [2—10, 28].

Исследования, выполненные по данным об атмосферном давлении и данным геофизических измерений, показали, что именно изменения атмосферной циркуляции обуславливают усиление ряда геофизических предвестников — геоакустические шумы, эмиссию радона, изменение уровня подземных вод, деформацию и наклоны земной коры [6—9, 17, 18].

Между АЦП и формированием типа подвижки для определенного разлома существует тесная связь, проявляющаяся в пространственном расположении геоблоков и их реагировании на барические нагрузки таким образом, что только при появлении определенного АЦП образуется характерный для данного разлома тип подвижки [10].

Анализ изменения атмосферной циркуляции позволяет определить причину возникновения того или иного типа механизма очага землетрясений. Взаимное пространственное расположение циклонов и антициклонов и их быстрая смена — в течение двух-трех суток — позволяют уверенно выявить механизм очага: сброс или взброс. Исследования показывают, что области сжатия земной коры соответствуют областям высокого атмосферного давления, а области растяжения коры — областям низкого атмосферного давления. Эти первичные исследования выполнены по данным для 17 случаев и требуют дальнейших исследований. Однако анализ даже небольшого числа случаев показал устойчивый результат инициирования механизма землетрясений — сброса и взброса — в зависимости от изменения атмосферных процессов.

Предварительные исследования показали, что в зависимости от расположения антициклона и циклона относительно разломов наблюдаются правосторонние или левосторонние сдвиги.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС, 2014. 359 с.
2. Боков В.Н. Изменчивость атмосферной циркуляции — инициатор сильных землетрясений // Уральский геофизический вестник. 2004. № 6. С. 5—11.
3. Боков В.Н. Межгодовая изменчивость сейсмичности и атмосферной циркуляции // Ученые записки РГТМУ. 2008. № 6. С. 139—147.
4. Боков В.Н. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости // Ученые записки РГТМУ. 2010. № 14. С. 89—100.

5. Боков В.Н., Гутшабаиш Е.Ш., Потиха Л.З. Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С. 173—184.
6. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Воздействие атмосферной циркуляции на наклоны земной поверхности // Ученые записки РГГМУ. 2012. № 26. С. 173—184.
7. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Изменчивость геоакустической эмиссии и изменения атмосферной циркуляции // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 32. С. 173—184.
8. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Мониторинг геофизических предвестников и прогноз землетрясений // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 128—138.
9. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Вариации поверхностной температуры земной коры под влиянием изменчивости атмосферного давления // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 43. С. 106—115.
10. Боков В.Н., Лебедев С.В. Экзогенные процессы и сейсмичность // В сб.: Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием (Москва, 6—9 июня 2017 г.) / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2017. С. 379—386.
11. Бондур В., Гарагаиш И., Гохберг М., Лапшин В., Нечаев Ю., Стеблов Г., Шалимов С. Геомеханические модели и ионосферные вариации, ассоциированные с сильными землетрясениями под действием слабых градиентов атмосферного давления // Доклады РАН. 2007. Т. 414, № 4. С. 540—543.
12. Гохберг М.Б., Колосницын Н.И. Триггерные механизмы землетрясений // В сб.: Триггерные эффекты в геосистемах. Материалы Всероссийского семинара-совещания (Москва. 22—24 июня 2010 г.) / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, 2010. С. 52—62.
13. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.Н. и др. Процессы подготовки, признаки и предвестники коровых землетрясений // Физика Земли. 1988. № 2. С. 59—67.
14. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. М.: Королёв, 2007. 160 с.
15. Злобин Т.К., Полец А.Ю., Поплавская Л.Н., Сафонов Л.А. Особенности современной глубинной сейсмикотектоники литосферы Южных Курил (район о-ва Итуруп) по механизмам очага землетрясений // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3. С. 35—40.
16. Колмогоров В.Г., Калюжин В.А. Приповерхностные деформации в районе Таштагольского геодинамического полигона // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 5. С. 15—19.
17. Латынина Л.А., Васильев И.М. Деформация земной коры под влиянием атмосферного давления // Физика Земли. 2001. № 5. С. 45—54.
18. Перцев Б.П., Ковалева О.В. Оценка влияния колебаний атмосферного давления на наклоны и линейные деформации земной поверхности // Физика Земли. 2004. № 8. С. 79—81.
19. Райс Дж. Механика очага землетрясения. М.: Мир, 1982. 217 с.
20. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения, метаморфизм и модель очага землетрясений // Доклады РАН. 2005. Т. 400, № 3. С. 372—377.
21. Ребецкий Ю.А. Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, № 1. С. 25—37.
22. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1979. 388 с.
23. Рогожин К.А. Тектоника очаговых зон землетрясений Северной Евразии конца XX столетия // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2, № 1. С. 21—28.
24. Ружич В.В., Кочарян Г.Г. О строении и формировании очагов землетрясений в разломах на приповерхностном и глубинном уровне земной коры. Статья I. Приповерхностный уровень // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 1021—1034.
25. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
26. Солоненко Н.В., Мельникова В.И. Механизмы очагов землетрясений Байкальской рифтовой зоны за 1981—1990 гг. // Геология и геофизика. 1994. Т. 35, № 11. С. 99—107.
27. Спивак А.А. Проявление разломных зон в геофизических полях // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5, № 2. С. 507—525.
28. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 100 с.
29. Трубицын А.П., Макалкин А.Б. Деформации земной коры под действием атмосферных циклонов // Физика Земли. 1976. № 5. С. 94—96.
30. Национальный сейсмологический центр США [<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>]