

В.Н. Боков, В.Н. Воробьев

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

V.N. Bokov, V.N. Vorobiev

VARIABILITY OF GEOACOUSTIC EMISSION AND CHANGE OF ATMOSPHERIC CIRCULATION

Представлены результаты исследований влияния преобразований атмосферной циркуляции на возникновение геоакустической эмиссии. Геоакустическая эмиссия используется в качестве краткосрочного предвестника землетрясений. По данным измерений геоакустической эмиссии выполненных на Камчатке и расчетам преобразований атмосферной циркуляции показано, что изменчивость геоакустической эмиссии обусловлена пространственно-временными изменениями атмосферы. Совместный мониторинг геоакустической эмиссии и изменений атмосферной циркуляции позволяет более надежно определять вероятность сейсмического события.

Ключевые слова: преобразования атмосферной циркуляции, геоакустическая эмиссия, краткосрочный предвестник землетрясений, мониторинг геоакустической эмиссии.

In this article the results of the research of the influence of transformation of the atmospheric circulation onto the origin of the geoaoustic emission are shown. The geoaoustic emission is used as a short term precursor of the earthquakes. According to the data of the measurement of the geoaoustic emission done at the Kamchatka peninsula and the calculation of the transformation of the atmospheric circulation it is shown that the variability of the geoaoustic emission is due to space – temporal changes in the atmosphere. The mutual monitoring of the geoaoustic emission and the changes in atmospheric circulation allows a more precise prediction of the probability of the seismic event.

Key words: of transformation of the atmospheric circulation, the short term precursor of the earthquakes, the monitoring of the geoaoustic emission.

Геоакустическая эмиссия (ГАЭ) или сейсмические шумы интенсивно изучается в последние годы в качестве предвестника землетрясений [1, 4–8, 10, 12, 13, 15]. Однако на сегодняшний день успехи в прогнозировании сейсмических событий с использованием измерений ГАЭ достаточно скромные [13].

Геоакустическая эмиссия наблюдается в шахтах, скважинах, туннелях, на поверхности Земли и на дне водоемов, характеризуя изменение состояния деформации поверхности земной коры. ГАЭ порождаются не только процессом разрушения пород, дискретным характером крипа и ползучести, но и дегазацией геохимическими процессами [1, 4]. До настоящего времени интерпретация причин возникающих ГАЭ не является завершенной и полной [10–12].

Твердая часть породы (скелет) характеризуется дискретной гетерогенной структурой с порами, трещинами, напряженным состоянием на неоднородностях, дефектами [11]. Сочетание такой структуры скелета и распределения напряжений приводит к квазистабильному состоянию породы [11]. Однако, при литостатических давлениях около 100 МПа, породы реагируют на ничтожно малые деформации порядка 10^{-7} м (земные приливы), 10^{-10} м (собственные колебания Земли) акустической и электромагнитной активностью, о чем свидетельствуют микроразрушения, возникновение новых дефектов и трещин [10, 11].

Существенную роль в активизации деформационных процессов играет насыщенность пород флюидами, что обусловлено снижением прочности пород за счет уменьшения внутреннего трения, электрохимических процессов и других факторов. Процессы деформации нарушают сложившуюся схему распределения давлений, флюида, газонасыщенности пластов, температур. В результате возрастает динамика скелета и, как следствие, проницаемость коллекторов, и проявление ГАЭ [1, 4, 5, 13].

Спектральные оценки ГАЭ, выполненные по длительным, эквидистантным рядам измерений акустических шумов в глубокой скважине в частотном диапазоне 30–1200 кГц, выявили статистически значимые пики на частотах в 7 и 1 сутки [4].

Наличие суточного хода ГАЭ используется при прогнозах землетрясений [4, 7, 8, 13]. Измерения показали, что периоду низкой сейсмической активности соответствует наличие характерного суточного хода уровня геоакустической эмиссии [7, 8]. Считается, что суточный ход ГАЭ обусловлен существованием суточного хода уровня электромагнитного поля [4, 7, 8, 13]. В работах [7, 8] подчеркивается исчезновение суточного хода ГАЭ перед землетрясениями. Этот факт геологи объясняют изменением чувствительности горной среды к модулирующему электромагнитному воздействию вследствие изменения напряженно деформационного состояния земной коры. Однако причины вызывающие изменения напряженно деформационного состояния земной коры и фиксируемые измерениями ГАЭ исследованы недостаточно. В большинстве публикаций появление подземных акустических шумов связывают с приливными явлениями обусловленные влиянием Луны и Солнца и земных приливов [5, 6, 12, 13]. При этом выявлено, что корреляция приливных явлений наблюдается только с сейсмически слабыми событиями.

Мы считаем, что изменчивость ГАЭ зависит от изменений атмосферной циркуляции, роль которой может быть сравнима с ролью тектонических напряжений, поскольку фиксируется на поверхности коры. Геофизические процессы, возникающие на поверхности земной коры, имеют более тесную связь с экзогенными процессами, чем с эндогенными процессами. Наличие в функции спектральной плотности ГАЭ статистически значимого пика на частоте в 7 суток, может служить первоначальным подтверждением влияния атмосферной циркуляции, поскольку соответствует периоду естественного синоптического периода.

Следует отметить, что интенсивные и продолжительные сигналы ГАЭ наблюдаются только за 1–2 суток до сильных сейсмических событий. Это как раз тот характерный временной интервал, в течение которого смещаются атмосферные вихри над пунктом измерений в районе Камчатки.

При этом практически во всех работах влияние метеорологических условий на изменчивость ГАЭ считается незначительным [7, 8], хотя, как правило, для анализа используются данные одной или двух рядом расположенных метеостанций. Авторы подобных работ не учитывают то, что атмосферные поля охватывают площади от сотен тысяч до миллионов км², создавая значительные деформации на поверхности земной коры [2, 3, 14].

Поля атмосферного давления обладают макромасштабным деформационным воздействием, которое может быстро изменяться во времени и на пространстве. Такое воздействие наиболее ярко проявляется для двух сопряженных атмосферных объектов – антициклона и циклона [3]. Деформационное воздействие избыточной атмосферной массы (антициклона) прогибает земную кору:

$$\Delta P = -mg,$$

где g – ускорение силы тяжести; m – аномалия массы в единичном сечении столба атмосферы.

Поскольку действие избыточной воздушной массы превышает действие притяжения, то земная поверхность прогибается, создавая деформационные напряжения. При этом в циклонических полях наоборот, нагрузка на земную кору уменьшается и в результате земная поверхность приподнимается [2, 14].

В качестве примера такого воздействия рассмотрим две временные серии измерений высокочастотной ГАЭ на дне оз. Микижа (Камчатка) [4, 7, 8]. На рис. 1 и рис. 2 приведены графики геоакустических сигналов зарегистрированных 18.12.2002 и 23.05.2004 и заимствованные из работы [7]. Возникновение ГАЭ авторы [4, 7, 8] связывают с проявлением деформационных процессов обусловленных подготовкой сильных сейсмических событий.

Используя данные из архива атмосферных полей ЕЦСПП, мы выполнили расчеты и анализ изменчивости атмосферной циркуляции на периоды измерения геоакустических сигналов на оз. Микижа. В качестве показателя отражающего атмосферную нагрузку на земную поверхность были рассчитаны поля изменчивости атмосферного давления $\Delta P_{\tau}(r, t)$. Величина $\Delta P_{\tau}(r, t)$ рассчитывается как разница атмосферного давления в точках пространства (r) и во времени (t). Сдвиг времени по суткам τ – номер суток от начальной карты барического поля, для которой рассчитываются ΔP . Величина τ может меняться от 1 до 7 суток. Размерность $\Delta P_{\tau}(r, t)$ – гПа.

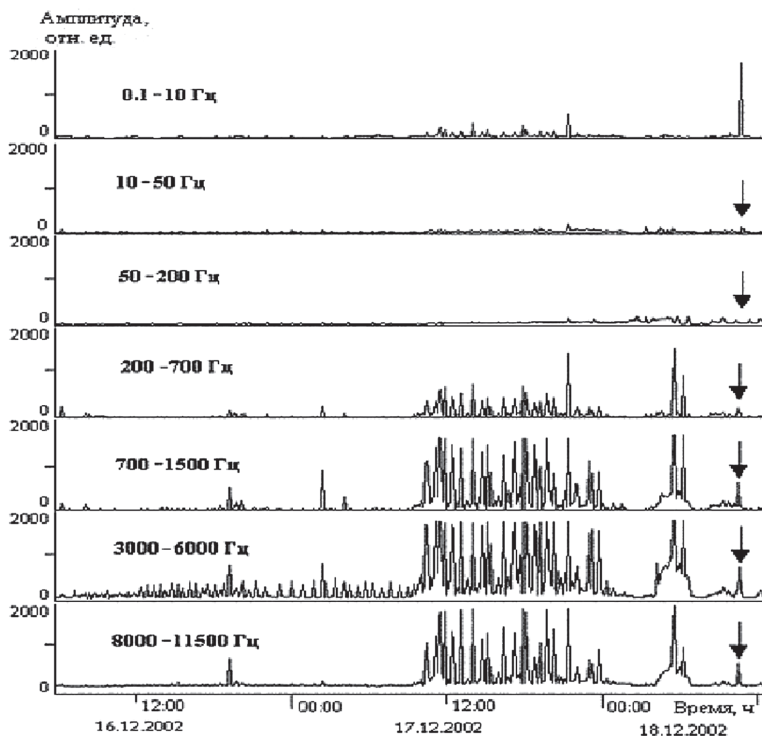


Рис. 1. Геоакустические сигналы, зарегистрированные на оз. Микижа 18.12.2002.

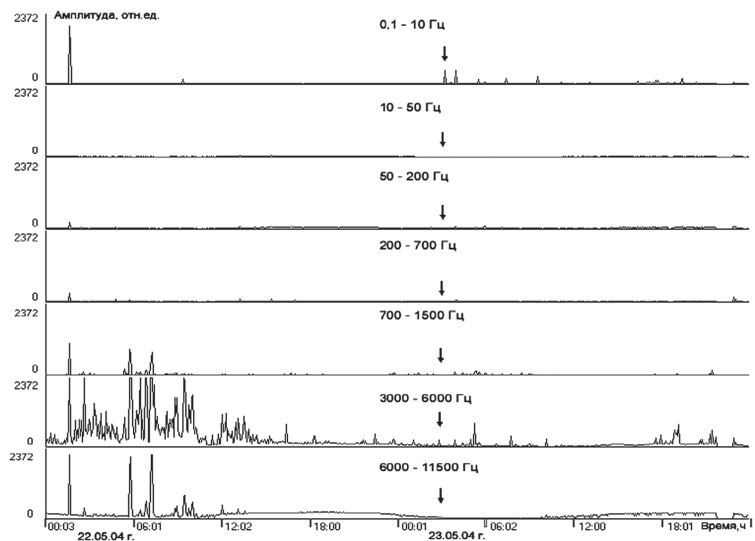


Рис. 2. Геоакустические сигналы, зарегистрированные на оз. Микижа 23.05.2004. Стрелками обозначено время сейсмических событий [7].

На рис. 3–8 представлены барические поля и поля нагрузок на земную поверхность за одни и двое суток до сейсмического события произошедшего 18.12.2002 с координатами 52,97° с.ш., 159,80° в.д.. На рис. 6 эпицентр землетрясения обозначен знаком звезды (*), а пункт измерений знаком +. Анализ карт барических полей показал, что за четверо суток до землетрясения (рис. 3) над территорией Камчатки (и над пунктом измерений) находился циклон. Территорию от оз. Байкал до о. Сахалин, а также акваторию Тихого океана южнее Японии занимал двухцентровый антициклон. На следующий день между двумя центрами антициклона возник хорошо выраженный циклон (рис. 4) уменьшив при этом площади ранее занимаемым антициклоном. При этом циклон над Камчаткой по-прежнему сохранялся. 17 декабря пришедший циклон сместился в сторону Камчатки и заметно углубился. Он вошел в общую систему циклонического поля с циклоном, располагавшимся над Камчаткой который, постепенно заполняясь, сместился к востоку. Над Чукотским морем образовался центр антициклона и в целом, территория Камчатки и прилегающая акватория Тихого океана оказалась в «окружении» области повышенного атмосферного давления (рис. 5). В этот день измерения ГАЭ показали сильное и продолжительное увеличение шумов рис. 1. Обращаясь к рис. 7 можно увидеть, что над пунктом измерения проходит нулевая изолиния, разделяющая северную область повышенной нагрузки на земную поверхность от южной области с пониженной нагрузкой. Эта изолиния характеризует движущуюся зону деформации земной коры, возникающую на границе областей с различным знаком нагрузки на кору, что сопровождается ГАЭ и регистрируется приборами. 18 декабря произошла регенерация циклона и усиление антициклонического поля (рис. 6). Однако в ночь с 17 по 18 декабря геоакустические шумы почти исчезли и возникли только утром. Почему это произошло, авторы [4] не смогли объяснить. Однако если мы обратимся к рис. 8, то увидим, что северная зона повышенной нагрузки сменилась на область пониженной нагрузки, что привело к снятию напряжения на земную кору и исчезновению ГАЭ. Утренний всплеск сигналов ГАЭ 18 декабря был обусловлен областью повышенной нагрузки образовавшейся в связи с усилением антициклона над Тихим океаном. Граница области повышенной нагрузки земной коры (или зона нулевой деформации земной коры) на короткое время «подошла» к пункту измерений своей северной частью вызвав утренний всплеск сигналов ГАЭ. В дальнейшем зона нулевой деформации земной коры «прошла» над точкой 52,97° с.ш., 159,80° в.д. инициировав землетрясение в 11 ч 9 мин.

При этом следует подчеркнуть, что высокочастотные акустические сигналы генерируются в непосредственной близости (1–3 км) от приемника. Однако как приемник чувствует землетрясение, произошедшее на расстоянии около 100 км и на глубине 30 км, для сейсмологов является загадкой. Однако приведенный выше анализ пространственно-временной изменчивости атмосферного давления позволяет разрешить «геологическую» загадку. Дело в том, что приемник чувствует не землетрясение, а напряжение вызванное изменчивостью атмосферного давления, которое простирается на сотни километров, это четко показывает приведенные рисунки, на которых четко видно появление всплесков ГАЭ при прохождении нулевой изолинии области повышенной нагрузки на земную поверхность.

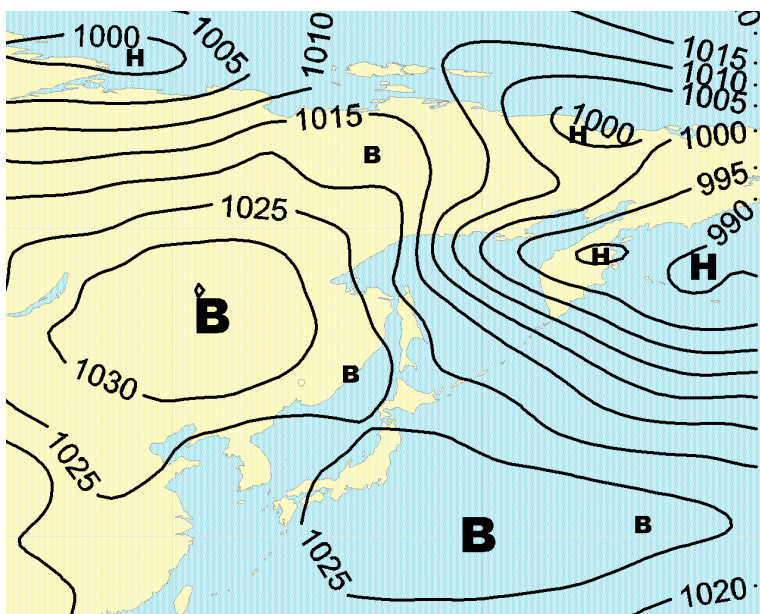


Рис. 3. Барическое поле за 15 декабря 2002 г.

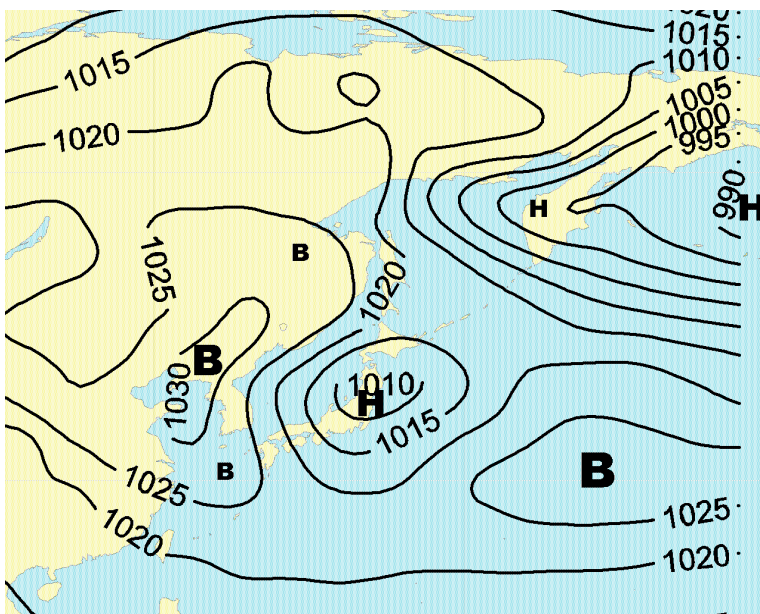


Рис. 4. Барическое поле за 16 декабря 2002 г.

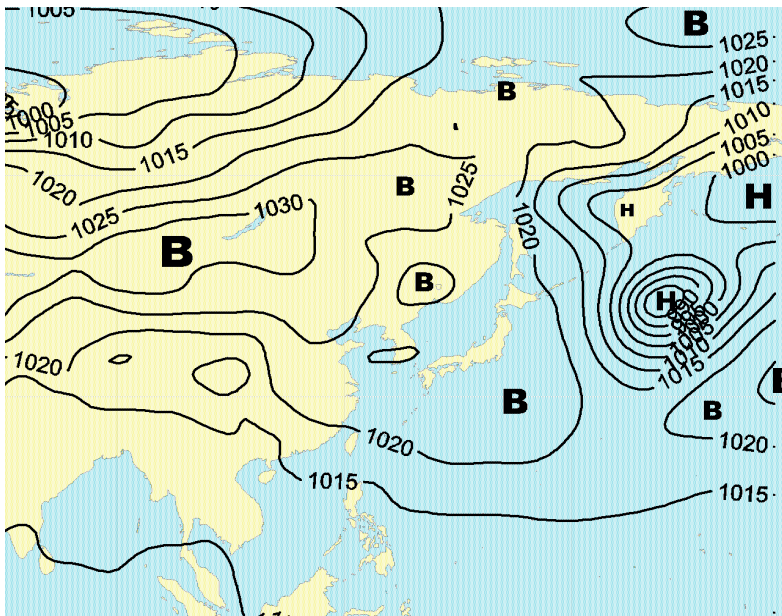


Рис. 5. Барическое поле за 17 декабря 2002 г.

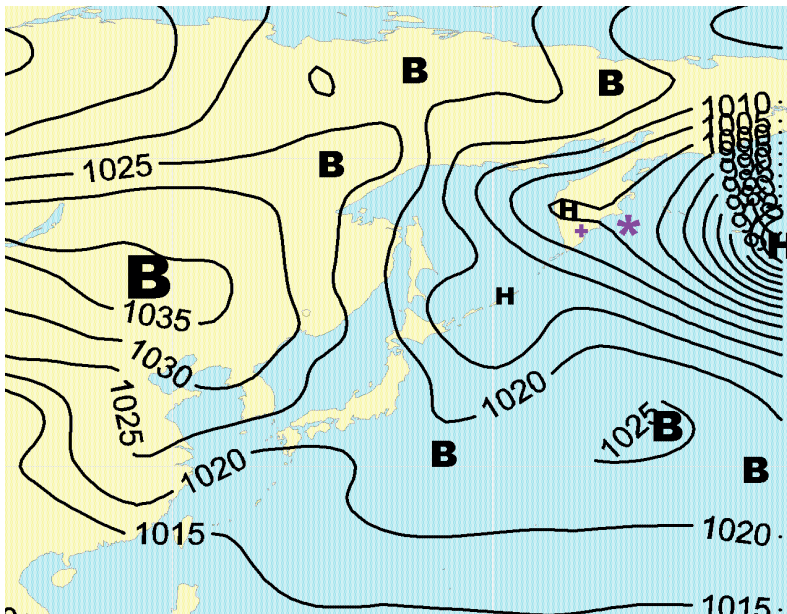


Рис. 6. Барическое поле за 18 декабря 2002 г.

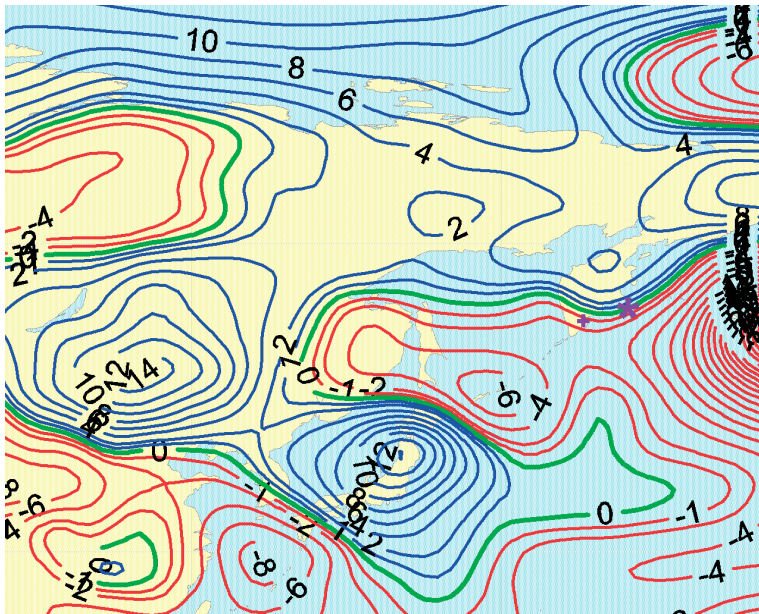


Рис. 7. Поле атмосферной нагрузки на 17 декабря 2002 г.

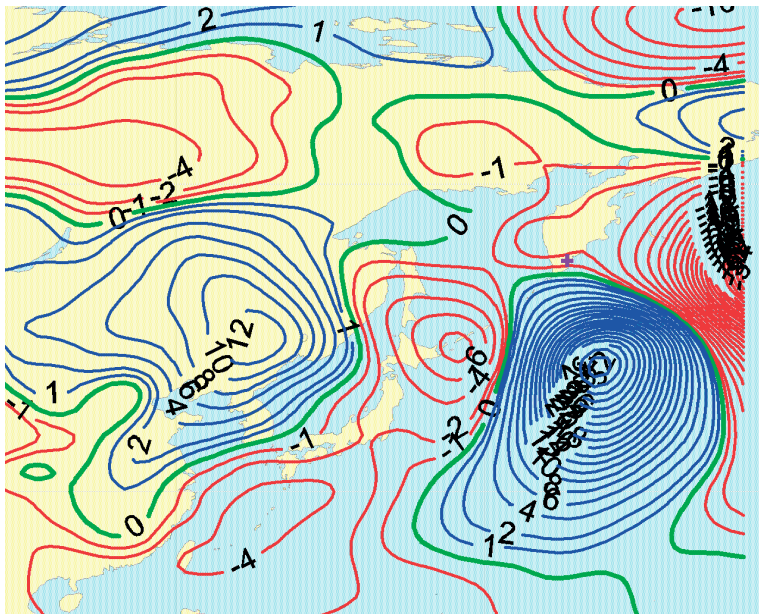


Рис. 8. Поле атмосферной нагрузки на 18 декабря 2002 г.

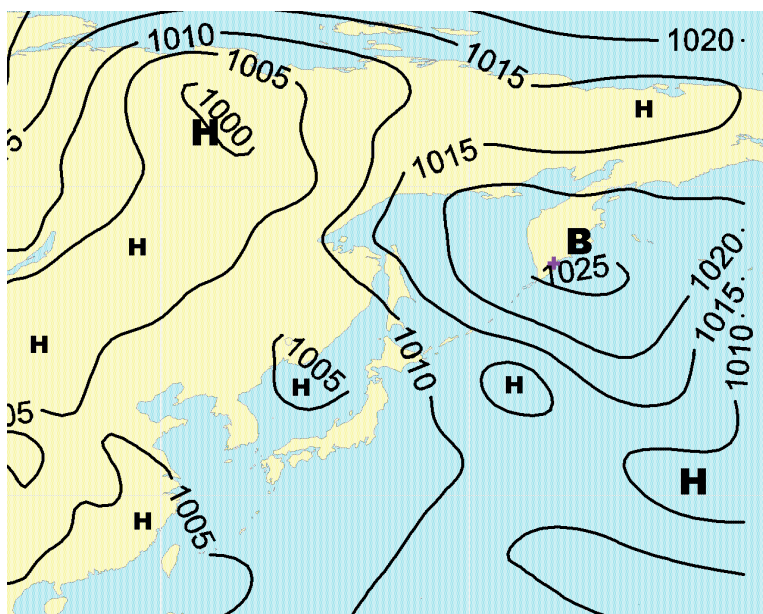


Рис. 9. Барическое поле за 22 мая 2004 г.

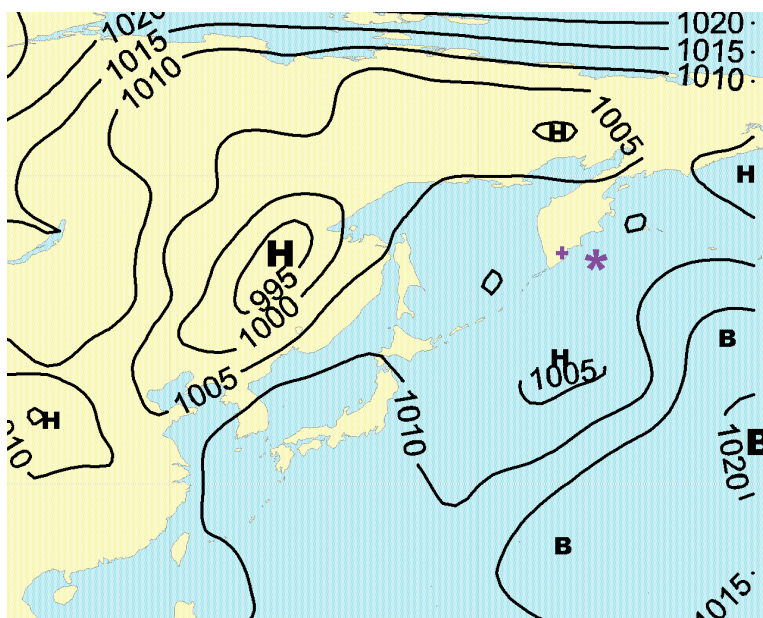


Рис. 10. Барическое поле за 24 мая 2004 г.

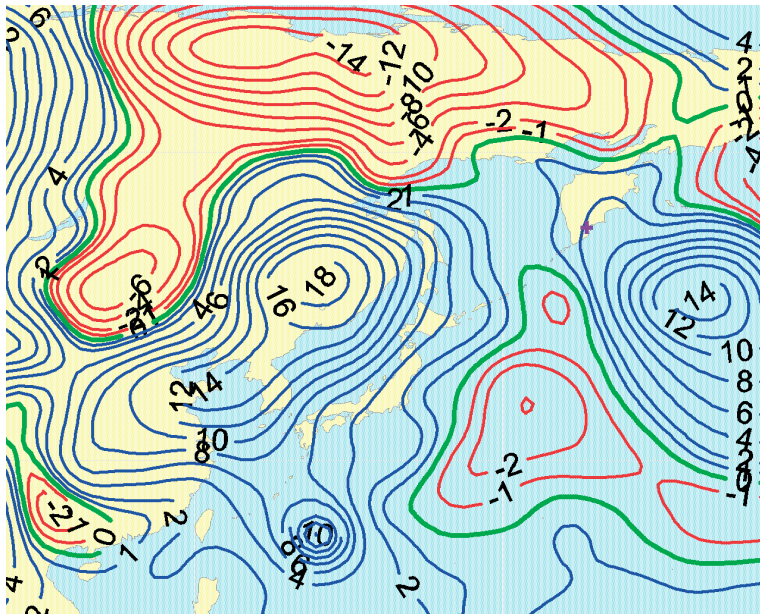


Рис. 11. Поле атмосферной нагрузки на 22 мая 2004 г.

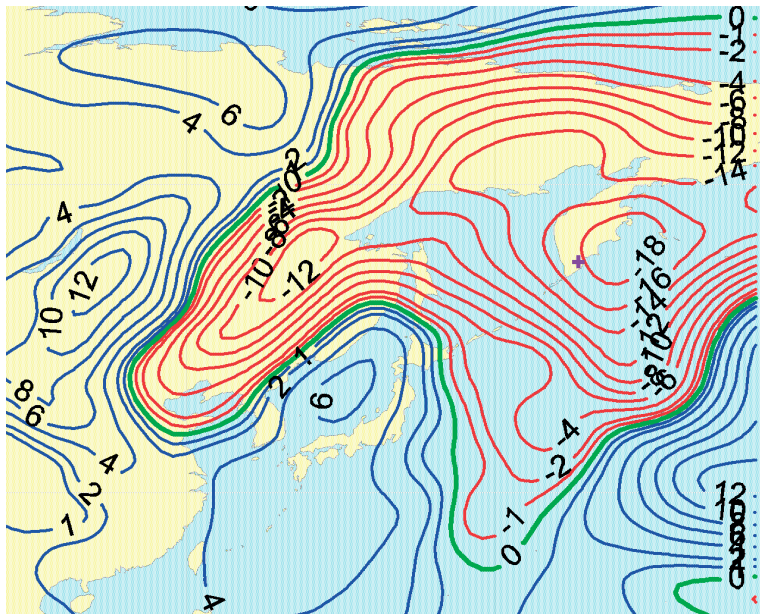


Рис. 12. Поле атмосферной нагрузки на 23 мая 2004 г.

Рассмотрим второй, наиболее чаще встречаемый, случай влияния атмосферной циркуляции на уровень ГАЭ. Данные измерения существенной ГАЭ предшествовали умеренному землетрясению 23.05.2004 у побережья Камчатки. На рис. 9–12 представлены барические поля и поля атмосферной нагрузки за одни и двое суток до сейсмического события произошедшего 23.05.2004 с координатами $51,88^\circ$ с.ш., $158,81^\circ$ в.д. На рис. 10 эпицентр землетрясения обозначен знаком звезды (*), а пункт измерений знаком +. Анализ карт барических полей показал, что за сутки суток до землетрясения (рис. 9) над территорией Камчатки (и над пунктом измерений) находился антициклон. Территорию от оз. Байкал до о. Сахалин, а также восточную часть Сибири занимало циклоническое поле. Указанный антициклон сформировал область повышенной нагрузки на земную поверхность. Это видно на рис. 11, на котором представлено поле атмосферной нагрузки за 1 сутки. Видно, что в пункте измерения геоакустических сигналов на оз. Микижа наблюдается область положительных значений атмосферной нагрузки с близко расположенной нулевой зоны деформации земной коры. С 22 мая происходило интенсивное разрушение антициклона над пунктом измерения и смещение центра антициклона в южном направлении. На следующий день после землетрясения 24.05.2004 над Камчаткой и пунктом измерения ГАЭ наблюдалось циклоническое поле. За двое суток атмосферное давление здесь уменьшилось на 25 гПа. Смещение нулевой зоны деформации земной коры, с последующим ее смещением к югу, и обусловило всплеск сигналов ГАЭ в течение 22 мая 2004 г. В день землетрясения, над пунктом измерения геоакустических сигналов наблюдалась область пониженной нагрузки (рис. 12), что привело к снятию деформации на земную кору и исчезновение ГАЭ (рис. 2).

В двух приведенных примерах изменчивости сигналов ГАЭ, атмосферная циркуляция представлена для зимнего и летнего сезонов. Поэтому характер изменчивости атмосферных процессов различен. Однако мы убедились, что в обоих случаях появление всплески ГАЭ были связаны с деформацией земной коры, изменчивость которой определяла атмосферная циркуляция.

Следует подчеркнуть, что во всех работах посвященных исследованию ГАЭ [1, 4–8, 10, 12, 13] приводятся сведения о несоответствии измерений ГАЭ во временных рядах расположенных рядом пунктов наблюдений, а также в связях пространственного распределения результатов измерений с параметрами очага готовящегося землетрясения. Показано, что коэффициент корреляции между энергией сейсмических событий и энергией их ГАЭ оказался небольшим и равным 0,3. Это указывает на наличие неизвестных факторов влияющих на изменчивость ГАЭ в пространственном и временном масштабах. Также указывается на то, что только половина сильных сейсмических событий предвращается аномальными ГАЭ сигналами.

Результаты исследований двадцати случаев позволяют сделать вывод о том, что одним из таких неизвестных факторов является атмосферная циркуляция. Без использования методологии исследований представленных в данной статье, сейсмологам будет трудно объяснить процесс образования или усиления ГАЭ предшествующие землетрясениям.

Организация исследований по выявлению связей атмосферной циркуляции с данными измерений ГАЭ позволит определить региональные критерии, при которых мониторинг ГАЭ и изменений атмосферной циркуляции позволят точнее предсказать время и место эпицентра землетрясений.

Литература

1. *Беляков А.С., Гамбурцев А.Г., Лавров В.С., Николаев А.В., Приваловский Н.К.* Иницирующие вибровоздействия и сейсмическая эмиссия горных пород. // *Физика Земли*, 1996, № 2, с. 68–74.
2. *Боков В.Н.* Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений. // *Известия РГО РАН*, 2003, т. 135, вып. 6, с. 54–65.
3. *Боков В.Н., Гутшабаиш Е.Ш., Потиха Л.З.* Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений. // *Ученые записки РГГМУ*, 2011, № 18, с. 173–184.
4. *Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В.* Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью. // *Вулканология и сейсмология*, 2006, №1, с. 52–67.
5. *Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др.* Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений. // *Докл. РАН*, 2006, т. 407, № 5, с. 669–672.
6. *Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Синицын В.И., Чебров В.Н.* К вопросу о связи высокочастотного сейсмического шума с лунно-солнечными приливами. // *Докл. РАН*, 1995, т. 340, № 3, с. 386–388.
7. *Купцов А.В.* Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке. // *Физика Земли*, 2005, № 10, с. 59–65.
8. *Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М.* Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений. // *Вулканология и сейсмология*, 2005, № 5, с. 45–59.
9. *Николаев А.В.* Проблемы наведенной сейсмичности. *Наведенная сейсмичность*. – М.: Наука, 1994, с. 5–15.
10. *Рыкунов Л.Н., Салтыков В.А., Синицын В.И., Чебров В.Н.* Характерные параметры высокочастотного сейсмического шума перед сильными камчатскими землетрясениями 1996 г. // *Докл. РАН*, 1998, т. 361, № 3, с. 402–404.
11. *Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
12. *Салтыков В.А.* Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов. // *Докл. РАН*, 1995, т. 341, № 3, с. 406–407.
13. *Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А.* Особенности пространственной связи приливной компоненты сейсмических шумов с областями подготовки сильных землетрясений (по материалам долговременных режимных наблюдений на Камчатке). // *Физика Земли*, 2007, № 9, с. 48–60.
14. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб.: Гидрометеоздат, 2002. – 366 с.
15. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.