

УДК 550.34, 551.5

Л.М.БОГОМОЛОВ

От исследований штормовых микросейсм к анализу сейсмо-ионосферных эффектов

Многие исследования, проведенные в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ранее СахКНИИ) в сотрудничестве с другими научными учреждениями, имеют междисциплинарный характер. Обращаясь к результатам таких исследований, можно проследить трансформацию задач от прошлого века к современности. Показательным примером может служить рассматриваемый в данном обзоре цикл работ о штормовых микросейсмах и связанных с ними явлениях в гидросфере, атмосфере и твердой земле.

Ключевые слова: колебания давления, штормовые микросейсм, сейсмическая активность.

From storm microseism study towards seismic ionospheric effects. L.M.BOGOMOLOV (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

A number of investigations conducted at IMGG, FEB RAS (formerly SakhCSRI) in cooperation with other research institutions were of interdisciplinary kind. Referring to the results of such investigations one can see the transformation of tasks from last century to nowadays. The works on storm microseism problem and relevant phenomena in hydrosphere, atmosphere and solid earth represent a prime example.

Kew words: pressure fluctuations, storm microseisms, seismic activity.

В 1970-х годах в СахКНИИ ДВНЦ АН СССР (как тогда назывался Институт морской геологии и геофизики – ИМГиГ) проводились исследования колебаний давления воды у дна северо-западной окраины Тихого океана. Важные сведения о флуктуациях давления на разных стадиях штормов были получены для шельфа вблизи о-ва Шикотан, который является уникальным местом для таких исследований благодаря своему положению – выдвинутости по отношению к дуговой линии Курильских островов. Публикации Ф.И.Монахова, В.А.Нестерова, В.М.Жака, Е.А.Куликова, Ю.С.Рожкова, Г.И.Христофорова [5, 6, 9, 10, 12], посвященные этим исследованиям, свидетельствуют о том, что ряд полученных результатов и в настоящее время сохраняет свою актуальность. В этих работах на основе анализа особенностей спектральных распределений флуктуаций давления, возникающих при штормах, вызванных прохождением циклонов, был сделан вывод о генерации штормовых микросейсм в прибрежной части, с глубинами до 30 м. Последующие работы показали, что в некоторых случаях возбуждение штормовых микросейсм [7, 8] может сыграть роль регулятора сейсмической активности, способствующего уменьшению числа землетрясений умеренной силы (энергетический класс по С.Л.Соловьеву – К-9-11) в период интервала, когда амплитуда микросейсм превышала некоторый пороговый уровень. Была предложена [11] интерпретация этого явления как частичной разрядки тектонических напряжений под влиянием вибраций (штормовых микросейсм). Эта гипотеза получила широкую известность позднее, в конце XX в., благодаря результатам [7, 13, 16], основанным на данных для других регионов и других эндогенных факторов сейсмического процесса. Тем не менее представляется важным отметить вклад исследований на Дальнем

БОГОМОЛОВ Леонид Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск). E-mail: bogomolov@imgg.ru

Настоящее исследование осуществлено благодаря частичной поддержке грантов РФФИ № 11-05-00155-а, 11-05-98-529-р_восток.

Востоке [5, 6, 9, 10–12] в становление научного направления «взаимодействие геосфер», включающего, в частности, вопросы наведенной и триггерной сейсмичности [13], влияния деформационного процесса в литосфере на вариации физических полей в атмосфере и ионосфере [19]. Естественно, что упомянутые работы имели и непосредственную научно-практическую значимость, например, для разработки проблем разрушения берегов.

В данном обзоре представлены некоторые результаты 1970–1980-х годов не только с мемориальной целью, но и для обсуждения возможности повторного проведения подобных исследований с использованием современных аппаратно-методических средств, в частности представленных в [2]. Мы сочли возможным сфокусировать внимание на публикациях тех лет [5, 6, 9, 10–12], считая, что более поздние работы сотрудников ИМГиГ, ориентированные на проблему цунами (В.М.Кайстренко, П.Д.Ковалева, О.Н.Лихачевой, А.А.Поплавского, Г.В.Шевченко и др. – см. библиографию в [2]), достаточно известны.

Методика и результаты исследований

Согласно [5, 9, 10], задачей исследований было конкретизировать, какой из двух механизмов возбуждения штормовых микросейсм преобладает (резонанс со стоячими морскими волнами, образующимися в определенных областях, в частности в центре циклона, или разрушение волн на мелководье). Для этого рассматривались данные о колебаниях давления воды в периоды прохождения вдоль Курильских островов глубоких циклонов 8–11 февраля 1974 г., 10–11 октября 1976 г. (рис. 1), а также более отдаленного циклона 18 ноября 1977 г. Регистрация колебаний давления проводилась при помощи низкочастотного гидрофона (чувствительность ниже 1 Гц), установленного у дна на глубине 30 м в 10 км к востоку от о-ва Шикотан. Сигналы гидрофона передавались на остров по кабелю. Для регистрации микросейсм использовались длиннопериодные сейсмографы СКД и короткопериодные сейсмографы СКМ, установленные в штольне на о-ве Шикотан.

Начиная с первого из упомянутых циклонов [1] отмечалась полная корреляция между развитием волнения вблизи острова и возрастанием амплитуды микросейсм. При этом полоса локализации спектральной плотности штормовых микросейсм соответствовала диапазону периодов 3–7 с, с максимумом для $T_s = 5–6$ с. Для флуктуаций давления воды был установлен диапазон периодов $T_p = 12–16$ с во время шторма 8–11.02.1974 [10] и $T_p = 6–11$ с во время циклона 10–11.10.1976. Для второго случая зависимости амплитуд микросейсм и колебаний давления воды (пересчитанные на миллиметр водяного столба) в зависимости от периодов показаны на рис. 2.



Рис. 1. Схемы трасс циклонов и расположения донной станции. Центр циклона (кружки на линии) проходил в стороне от о-ва Шикотан. Цифры указывают значения атмосферного давления, гПа (в числителе – время измерения) при распространении циклона (по [9, 10])

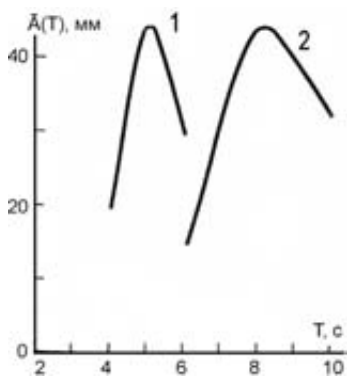


Рис. 2. Зависимости средних амплитуд микросейсм (1) и амплитуд давления воды (2) на глубине 30 м, приведенных к шкале изменения высоты столба воды в миллиметрах (по [9])

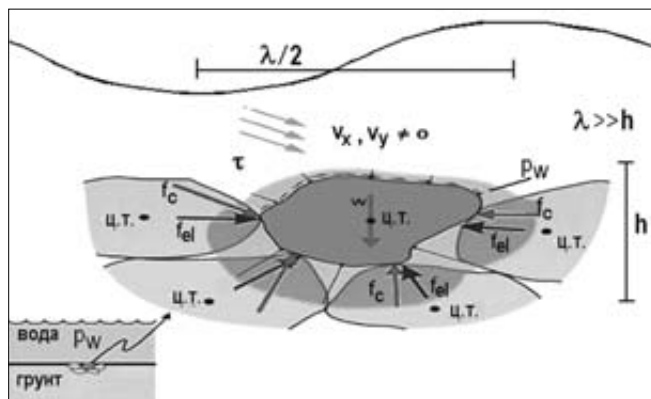


Рис. 3. Структурные и физические факторы нелинейности на границе вода–грунт на дне океана (по [20]), f_{el} – электрические силы между частицами, f_c – контактное взаимодействие, ц.т. – центр тяжести, P_w – давление воды, w – вес частиц, τ – сдвиговое напряжение вокруг частиц

В работе [12] обосновано, что передача энергии колебаний воды в твердую среду может обеспечиваться за счет нелинейного эффекта удвоения частот (аналогичного детектированию акустических колебаний). Действительно, значение $2 T_s$ в обоих случаях попадает в диапазон периодов T_p . Таким образом, данные свидетельствуют в пользу возбуждения микросейсм прогрессивными, а не стоячими волнами, для которых характерные значения периодов выше. С современных позиций наличие эффекта удвоения частоты очевидно, причем необходимая для него нелинейность связана с тем, что для гранулированных сред (донных осадков) описание границы с жидкостью отклоняется от модели упругой среды. Трансформация частот происходит в приповерхностном переходном слое конечной толщины h , воспринимающем колебания давления (рис. 3). Для гранулированных сред (осадочных пород) наличие множества зерен и их контактов определяет появление нелинейных эффектов (гистерезис баланса сил на контактах при колебаниях давления воды p_w) даже в случае волн с длиной $\lambda \gg h$. Контактное взаимодействие включает множество эффектов, свой вклад вносят сейсмoeлектрические и электрокинетические эффекты, связанные со смещением жидкости относительно твердой среды [20].

Следует заметить, что в работах [9, 10] вывод о возбуждении микросейсм с периодами 3–7 с прогрессивными, а не стоячими волнами был обоснован иначе – из соображений от противного. Если бы усиление микросейсм было связано со стоячими волнами, то источником была бы центральная область циклона. В таком случае естественно ожидать, что максимальная интенсивность микросейсм могла наблюдаться раньше максимального волнения у берегов о-ва Шикотан, которое задерживается на время распространения волн из штормовой области в центре циклона (рис. 1). Однако задержка не была обнаружена. Если для диапазона частот порядка 0,1 Гц усиление микросейсм происходит за счет энергии прогрессивных волн и источником являются прибрежные области, то для более низких частот (порядка 0,01 Гц или меньше) могут иметь значение стоячие волны. Это показано в работах В.Н. Табулевич [14, 15], где обращено внимание на возможность возникновения стоячих волн с периодами 100 с и более при столкновении двух противоположно направленных систем бегущих волн (столкновение штормов). Область стоячих водяных волн, площадь которой может достигать сотни квадратных километров, может также сформироваться в тыловой части циклона (тайфуна) [14]. Колебания с вертикальной поляризацией передаются в атмосферу, где образуют микробаромы и акустико-гравитационные волны с инфранизкими частотами ($T \sim 100$ с). Они также могут передаваться земной коре, вызывая микросейсмические волны на этих частотах.



Рис. 4. Комплекс взаимосвязанных явлений в земной коре и в атмосфере и гидросфере, возникающий от стоячих водяных волн, согласно [15]

анализируемого с точки зрения ионосферных предвестников землетрясения. Поэтому информация о колебаниях давления воды становится важной для интерпретации ионосферных данных.

В работах [14, 15] было обращено внимание на примеры влияния вибраций от штормов, когда возбуждаются микросейсмические волны, на режим сейсмичности в двух различных регионах – в районе гряды Курильских островов и на оз. Байкал. Для района Курил показано, что число землетрясений энергетических классов $9 < K < 11$ (магнитуды $2,8 \leq M < 3,9$), происшедших за месяц, максимально в период наименьшей интенсивности штормов. Наиболее отчетливые противофазные изменения штормовой и сейсмической активности наблюдались для выборки событий с гипоцентрами на глубинах менее 30 км. Для Байкальского региона проявляется интересная особенность. В зимние месяцы поверхность озера покрыта льдом и штормовые микросейсмические волны не возбуждаются, в отличие от осенних месяцев, когда воздействие штормов достигает максимума. В «тихие» зимние периоды число землетрясений ($8 \leq K < 14$) за месяц в среднем в 2,5 раза больше, чем в штормовое время года.

Оригинальные данные об условиях, когда реализуется влияние микросейсмических штормовых колебаний на сейсмическую активность, получены Б.Н. Науменко [11]. Этот результат основан на тех же измерениях амплитуды микросейсм и колебаний давления воды вблизи о-ва Шикотан, что и цикл работ [5, 9, 10, 12], и является, по существу, продолжением интерпретации данных, зарегистрированных сотрудниками СахКНИИ. Было продемонстрировано уменьшение числа слабых местных землетрясений (в диапазоне энергий $6 < K < 10$) в районе, охваченном штормом, в периоды, когда под воздействием морского волнения амплитуды микросейсм становятся выше 5 мкм. На рис. 5 воспроизведены примеры временных зависимостей микросейсм и распределений числа локальных землетрясений в районе о-ва Шикотан, которые могут подтвердить это положение.

По мнению автора [11], ход графиков на рис. 5 может свидетельствовать о частичной разрядке тектонических напряжений вследствие выделения накопленной энергии через вибрационное (штормовое) инициирование сейсмических событий низших классов. Суммарная энергия шторма, согласно [11], лежит в диапазоне 10^8 – 10^{18} Дж, и преобразование даже незначительной части этой энергии в упругие волны может отразиться на сейсмическом режиме.

Механизм передачи давления, по мнению авторов [14, 15], может быть аналогичен действию поршня, совершающего возвратно-поступательные движения. Описанный комплекс явлений был изучен в нескольких регионах, в частности в северо-западной части Тихого океана (к востоку от Курильских островов) и на оз. Байкал.

Актуальность вопроса об источниках возмущения атмосферы с инфранизкими частотами заметно возросла в связи с вопросом об ионосферных предвестниках землетрясения. По имеющимся представлениям [19], над областью дилатансии очага готовящегося землетрясения также могут возбуждаться акустико-гравитационные волны. Атмосферные возмущения с инфранизкими частотами достигают ионосферы и, вероятно, являются причиной вариаций параметра ТЕС (total electron concentration),

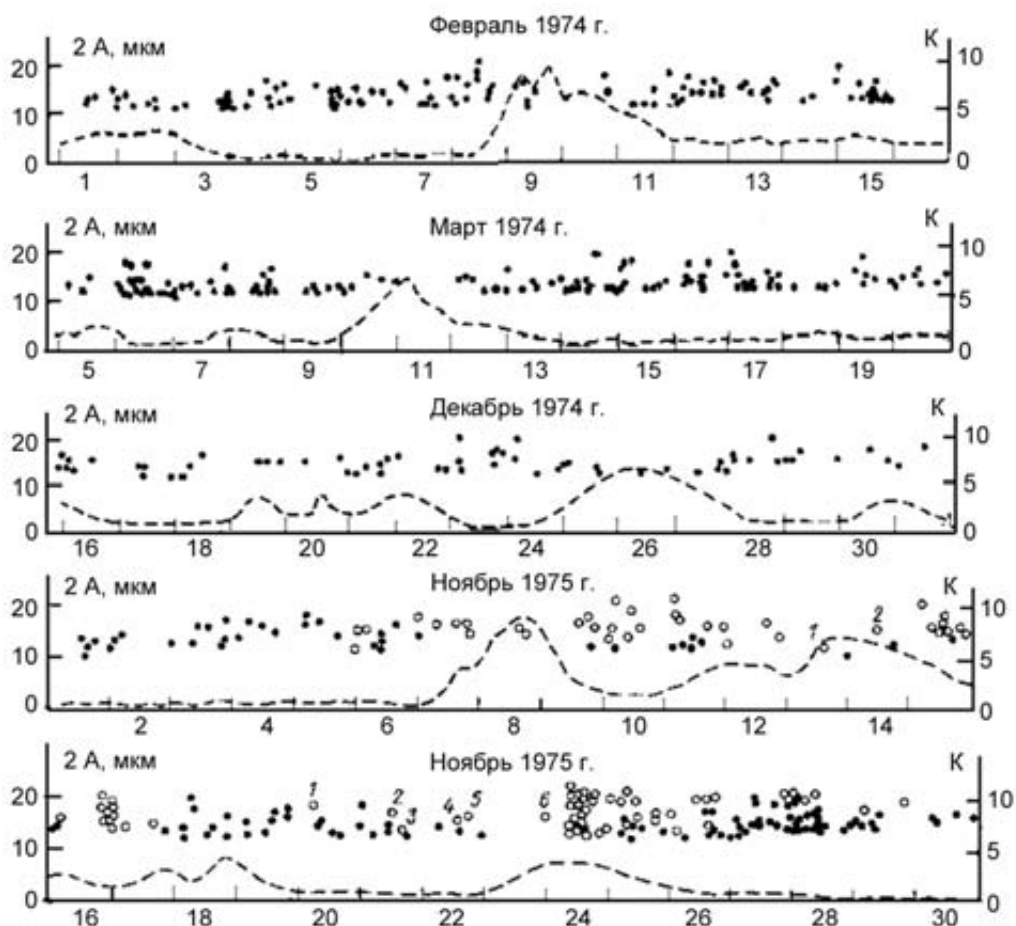


Рис. 5. Уменьшение числа событий локальной сейсмичности (темные и светлые кружки) в круговой зоне радиусом 150 км вокруг сейсмостанции «Шикотан» при возрастании уровня микросейсм в штормовые сезоны (по [11]). По горизонтали указаны даты (дни месяца). Различия в обозначениях событий не имеют значения для нашей работы

Обсуждение результатов и заключение

Примечательно, что результат, аргументирующий возможность частичной разрядки напряжений внешними факторами (в перспективе ими могут быть и искусственные), был представлен в публикации 1979 г. [11], вышедшей раньше других работ по этой проблеме. В 1980-е годы было показано [7], что в зоне вокруг плотины Нурекской ГЭС (Таджикистан) происходит значительное сокращение выделения сейсмической энергии, когда при интенсивном сбросе воды в горном массиве возбуждаются вибрации (микросейсм) с амплитудой не менее 0,2–0,5 мкм. На качественном уровне ситуация та же, что в случае воздействия штормовых микросейсм вблизи о-ва Шикотан – итогом является снижение вероятности возникновения умеренных по силе землетрясений. Однако характерные амплитуды, которые можно рассматривать как оценки порога эффекта, различаются на порядок. Можно попытаться установить количественное соответствие условий «вибросейсмического» эффекта из работ [7, 11], если заметить, что оценка пороговой амплитуды штормовых микросейсм $A \sim 5$ мкм относится к частотам $f \sim 0,1\text{--}0,3$ Гц (периоды 3–7 с), а для вибраций на Нурекской плотине с порогом $A \sim 0,2\text{--}0,5$ мкм

диапазон частот на порядок выше, соответствует основному диапазону сейсмоволн 1–10 Гц. С учетом этого получается, что амплитуды скорости для микросейсм в обоих случаях оцениваются как $\delta v \approx 2\pi \cdot f \cdot A_{tr} \sim 6$ мкм/с (принято среднее геометрическое от крайних значений). Из этой оценки вытекает, что характерная амплитуда колебаний давления для микросейсм при триггерном эффекте составляет $\delta p_{tr} \sim \rho \cdot V_s \cdot \delta v$, где ρ – плотность, V_s – скорость упругих волн в среде по месту регистрации микросейсм. Для значений $\rho \sim 2 \cdot 10^3$ кг/м³, $V_s \sim 4 \cdot 10^3$ м/с² получается $\delta p_{tr} \sim 50$ Па.

Приведенные оценки находятся в соответствии с результатами лабораторных экспериментов. В работах [3, 4], в которых моделировались эффекты проскальзывания блоков, отмечены изменения трения на контактах и, соответственно, характера движения при скоростях порядка нескольких микрон в секунду. При другой постановке экспериментов по моделированию сейсмического процесса на образцах горных пород, испытываемых на сжатие, было показано [1, 17], что инициирующее влияние на акустическую эмиссию могут оказывать вибрации с весьма малой амплитудой давления – примерно 10^{-6} от уровня главной нагрузки (50–100 МПа). Так как источником сигналов акустической эмиссии являются микротрещины (аналоги разрывов и подвижек в очагах землетрясений), то совпадение пороговых значений $\delta p \sim 5$ –100 Па для микросейсм в лабораторном и натурном масштабах не может быть случайным. Хотя количество примеров в работе [11] невелико, полученные результаты имеют важное значение как для анализа межгеосферных взаимодействий, так и для оценок сейсмической опасности. Результаты могут свидетельствовать и об исключительно удачном выборе места и времени измерений в рассмотренных работах. С учетом этого представляется целесообразным в настоящее время провести исследования, подобные [5, 9–12], в том же районе (вблизи о-ва Шикотан), но уже в режиме опытно-методического мониторинга с сохранением информации в цифровом виде. Это даст возможность применить методы статистического анализа и существенно дополнить обобщения из рассмотренных работ. Такое исследование важно и для анализа ионосферных предвестников землетрясений, поскольку магнитные бури, создающие помехи для ионосферных наблюдений, часто сопровождаются циклонами и штормами.

В завершение остановимся на вопросе, почему вариации атмосферного давления при таких погодных явлениях, как циклоны и антициклоны, которые могут составлять $\sim 10^3$ Па (т.е. несколько мм рт. ст.), влияют на микросейсмы только через гидросферу [13, 18]. Дело в том, что при прямом воздействии метеофакторов в достаточно глубокие слои передается лишь незначительная часть вариаций давления воздуха. В квазистатическом рассмотрении медленные изменения атмосферного давления гасятся в приповерхностном слое за счет пластических и псевдопластических эффектов (переупаковки зерен, гранул и т.п.). При описании изменений атмосферного давления как волны, падающей на дневную поверхность, амплитуду проходящей в недра волны можно оценить (пренебрегая затуханием) по коэффициенту пропускания (D), определяемому отношением акустических сопротивлений воздуха ($\rho_2 \cdot V_{s2}$) и твердой земли ($\rho_1 \cdot V_{s1}$). Этот коэффициент много меньше единицы: $D \sim 2 (\rho_2 \cdot V_{s2}) / (\rho_1 \cdot V_{s1}) \ll 1$, так что отсутствует противоречие с приведенными выше критическими величинами δp_{tr} , A_{tr} для микросейсм. Влияние атмосферных возмущений (циклонов и др.) на уровень микросейсм и вторичные деформационные эффекты осуществляются через возбуждение морского волнения.

Автор признателен Р.З.Тараканову и Г.В.Шевченко за консультации по историческим аспектам исследований в СахКНИИ ДВНЦ АН СССР – ИМГиГ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н. и др. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. 2001. Т. 40, № 10. С. 1678–1689.
2. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В. Экспериментальные исследования длинноволновых процессов на северо-западном шельфе Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2008. 216с.
3. Кочарян Г.Г., Кулокин А.А., Павлов Д.В. Некоторые особенности динамики межблокового деформирования в земной коре // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 5. С. 669–683.
4. Кочарян Г.Г., Кулокин А.А., Павлов Д.В. Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений // Физ. мезомеханика. 2006. Т. 9, № 1. С. 5–14.
5. Куликова Е.А., Нестеров В.А. Области образования штормовых микросейсм в северо-западной части Тихого океана // Физика Земли. 1980. № 5. С. 90–92.
6. Лаппо С.С. Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М.: Наука, 1979. 181 с.
7. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю. Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС // Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1987. С. 101–119.
8. Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л. Наведенная сейсмичность и возможности контролируемой разрядки накопленных напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С. 49–68.
9. Монахов Ф.И., Жак В.М., Нестеров В.А. Механизм генерации микросейсм штормом 10–11 октября 1976 г. у о. Шикотан // Физика Земли. 1978. № 4. С. 92–94.
10. Монахов Ф.И., Нестеров В.А., Рожков Ю.С., Христофоров Г.И. Условия образования штормовых микросейсм на о. Шикотан 8–11 февраля 1974 г. // Физика Земли. 1976. № 5. С. 97–100.
11. Науменко Б.Н. Явление частичной ликвидации тектонических напряжений штормовыми микросейсмками // Физика Земли. 1979. № 8. С. 72–75.
12. Нестеров В.А. Штормовые микросейсмки на острове Шикотан и флуктуации давления воды на дне Тихого океана // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 75–79.
13. Николаев А.В. Наведенная сейсмичность // Природные опасности России. Сейсмические опасности / под ред. Г.А.Соболева. М.: Крук, 2000. С. 139–164.
14. Табулевич В.Н., Дреннова Н.Н., Потапов В.А., Черных Е.Н. Влияние штормовых микросейсм на проявление сейсмичности в береговой зоне озера Байкал // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 8. С. 1271–1278.
15. Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука, 1986. 149 с.
16. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 152–160.
17. Трапезников Ю.А., Манжиков Б.Ц., Богомолов Л.М. Влияние слабых вибраций на деформирование горных пород при постоянной нагрузке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 2. С. 1–4.
18. Ярошевич М.И. Тропические циклоны как возможный фактор, влияющий на сейсмическую активность циклонической зоны северо-западной части Тихого океана // Физика Земли. 2011. № 7. С. 80–85.
19. Pulinet S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes. N. Y.: Springer, 2004. 316 p.
20. Web site of Zachry Department of Civil Engineering Texas A&M University (USA). – <http://ceprofs.civil.tamu.edu/briaud/> (дата обращения: 26.08.2009).