

ВЛИЯНИЕ ШТОРМОВЫХ ВИБРАЦИЙ НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В.Н. Табулевич, Е.Н. Черных, В.А. Потапов, Н.Н. Дреннова

Валентина Николаевна Табулевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института земной коры СО РАН, руководитель проекта 00-05-64573.

Владимир Антонович Потапов, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией того же института.

Евгений Николаевич Черных, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник того же института.

Нина Николаевна Дреннова, главный специалист того же института.

Первую публикацию см.: «Природа». 2002. №10. С. 12 — 16

*И в небе и в Земле есть многое такое, о чем
не снилось вашей мудрости, Горацио.*

У. Шекспир

Толчая, бегущие волны и микросейсмы

Поверхность мирового океана составляет 70,8% от всей площади земной сферы. Над океанами зарождаются катастрофические циклоны и тайфуны, в которых воздушные массы вращаются с ураганной скоростью. Круговое движение происходит относительно некоторого центра, называемого глазом бури. Та кой «волчок», кроме вращательного, имеет еще и поступательное движение с причудливыми, трудно предсказуемыми траекториями. Обрушиваясь на берег со скоростью до 100 м/с, он сметает все на своем пути. В переменном ветровом поле циклона (тайфуна) и его движении над акваториями возникают стоячие водяные волны — толчая. Такие волны в открытом океане мало изучены: они недоступны непосредственным наблюдениям и измерениям. Имеются лишь редкие сообщения капитанов кораблей, оказавшихся случайно в центре циклона, в области толчеи. Робин Нокс Джонстон, например, огибая мыс Доброй Надежды во время кругосветной гонки на яхте, записал: «...наступил вечер 5 сентября. Днем ветер изменил направление и задул с запада, быстро развивая крупное волнение, которое столкнулось с зыбью прежнего ветра. Это вызвало толчею, и теперь волны шли со всех направлений. Яхта прыгала среди толчеи как взбесившийся жеребец» [1].

Область стоячих водяных волн (СВВ) генерирует периодически изменяющееся давление на дно океана, не затухающее с глубиной [2, 3]. Под влиянием этого давления в земной коре возникают слабые колебания — так называемые штормовые микросейсмы. Толчая образуется при столкновении двух противоположно направленных систем бегущих волн или взаимодействии встречного ветра с волнами зыби (рис.1). Область стоячих водяных волн, располагающаяся в тыловой части циклона (тайфуна), составляет сотни квадратных километров. Такие колебания могут быть уподоблены поршню, совершающему возвратно-поступательные движения. Поднимаясь вверх, они образуют микробаромы, вниз — микросейсмы на дне. Колебания, вызванные стоячими волнами, когерентны (синфазны). Этот комплекс явлений экспериментально подтвержден и подробно описан в работах сотрудников Ламонтской геофизической обсерватории и др. [4, 5].

Микросейсмы, вызванные стоячими водяными волнами движущихся циклонов, распространяются на большие расстояния. Их записывают все сейсмические станции мира, работающие в непрерывном режиме ожидания землетрясений. Например, микросейсмы от атлантических циклонов фиксируют не только станции, расположенные на европейском континенте, но и азиатские (в Ташкенте и Ашхабаде), сибирские (в Иркутске и Новосибирске) и многие другие. В противоположность редко возникающим стоячим волнам под действием однона-

правленного ветра всегда существуют бегущие волны. Тур Хейердал на своем плоту «Кон-Тики» смог пересечь Тихий океан благодаря устойчивому ветру, дующему главным образом с востока на запад, и бегущим волнам, подгонявшим плот. Но подобные волны, возникающие от однонаправленного ветра, не обладают свойством «накачивать» переменное давление на дно океана. Даже их удары о берег (прибой), создавая некогерентные (не синфазные) колебания земли, быстро затухают с расстоянием [4, 5]. Слабые микросейсмические волны от бегущих волн возникают локально. Их можно обнаружить на небольших (несколько десятков километров) расстояниях от берега.

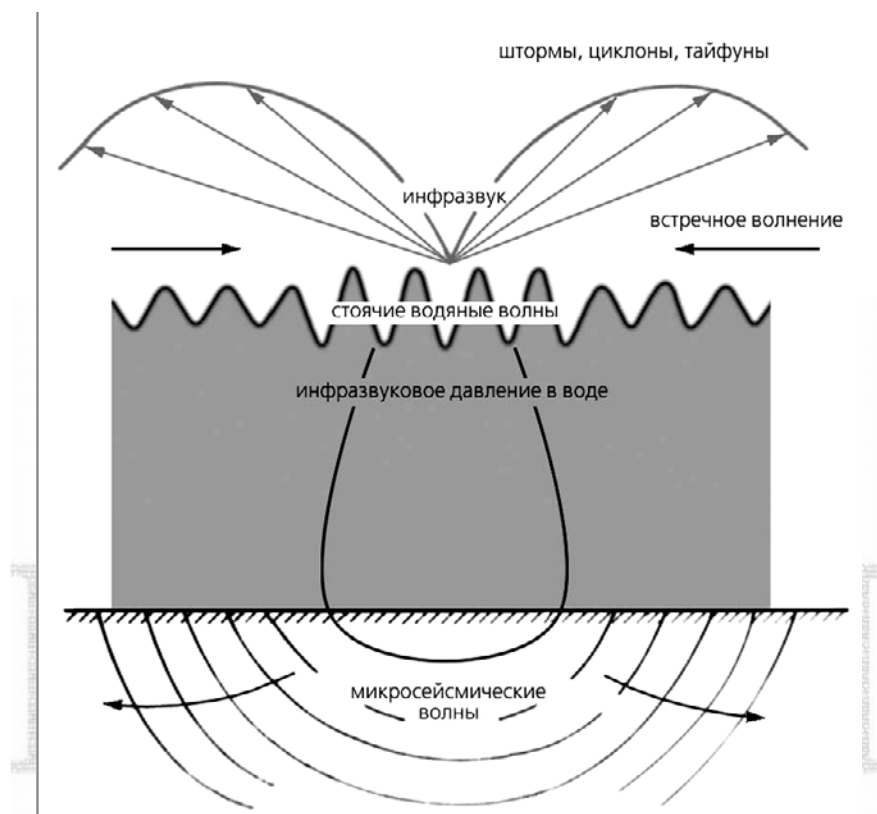


Рис.1. Комплекс явлений, возникающий от стоячих водяных волн, в атмо- и гидросферах и земной коре.

Энергия землетрясений и штормовые вибрации

Благодаря систематическим наблюдениям глобальных штормовых микросейсм, выполненным сетью из 65 сейсмических станций бывшего СССР, появилась возможность сопоставить действие вибрации (микросейсм) и энергию землетрясений.

Оценивая энергию (E) и мощность (W) микросейсмических колебаний, переданные земной коре, и энергию слабых землетрясений, мы обнаружили, что эти величины имеют один и тот же порядок. Мощность микросейсм в максимальной фазе шторма на океанах достигает $10^{10} - 10^{11}$ Дж/с, на малых водоемах типа оз. Байкал — $10^7 - 10^9$ Дж/с. Если учесть длительность (t) действующих процессов, то их энергия $E = \int_0^t W dt$ для малых водоемов будет примерно $10^8 - 10^{11}$ Дж, а для океанов — $10^{11} - 10^{13}$ Дж. Она соизмерима с энергией землетрясений классов 8—13, равной $10^8 - 10^{13}$ Дж, т.е. по порядку величин равна энергии микросейсм [6]. В сейсмологии силу действия землетрясений принято характеризовать двумя величинами: классом энергии (K) и величиной магнитуды (M). $M = 0,56K - 2,22$ [6]. Классы землетрясений 8—13 соответствуют магнитудам 2,3—5,1.

Неоднократно высказывалась мысль, что, поскольку землетрясения вызваны внезапным сбросом постепенно накапливающихся механических напряжений в земной коре, должна су-

существовать возможность искусственно «потрясти» конкретный участок при помощи некоего вибратора, чтобы снять эти напряжения, пока они не стали причиной катастрофических явлений. Посмотрим, существуют ли в природе такие механизмы?

Мы изучали влияние вибраций от штормов на сейсмичность в двух различных регионах — в районе Курильской гряды и на оз. Байкал.

В северо-западной области Тихого океана перемещаются многочисленные циклоны и тайфуны. Одни из них, формируясь на далекой Атлантике, движутся от континента на восток, другие, образуясь в южных широтах Северного полушария, описывают замысловатые траектории над Китайским, Японским и Охотским морями, а затем смещаются на северо-восток, в Тихий океан. Таким образом, на дно акватории в районе Курильских о-вов действуют интенсивные вибрации от циклонов и тайфунов. С 1968 по 1982 г. мы наблюдали за штормами и проявившимися землетрясениями с $K \geq 9$ ($M \geq 2,8$) южнее Камчатского п-ова и землетрясениями с эпицентрами под океаном, граничащими с Северной Японией (рис.2).

Штормы и их локация [4, 5] оценивались по данным тихоокеанских сейсмических станций. Для получения обобщенной оценки интенсивности штормов микросейсмы индексировались по двоичному коду [4]. Суммирование классификационных признаков дало возможность получить усредненную величину штормовых вибраций за каждый месяц. На рис.3 показана интенсивность штормов (ΣI) и число землетрясений (ΣN) классов $9 \leq K < 11$ ($2,8 \leq M < 3,9$), возникших за 1974—1975 гг. В наиболее тихие зимние месяцы количество землетрясений максимально. Рассматривая весь энергетический диапазон землетрясений от 9 до 16 класса (M = от 2,8 до 6,7) и сравнивая их количество с прошедшими над акваторией циклонами, можно заметить, что наибольшее влияние штормы оказывают на относительно слабые процессы ($9 \leq K < 11$ и $2,8 \leq M < 3,9$) на глубинах менее 30 км.

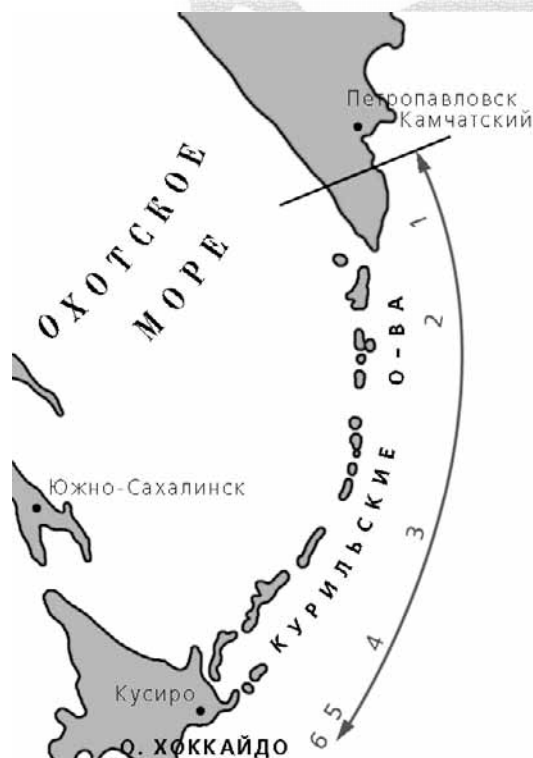


Рис.2. Районы наблюдений (1—6) за штормами (микросейсмями) и землетрясениями.

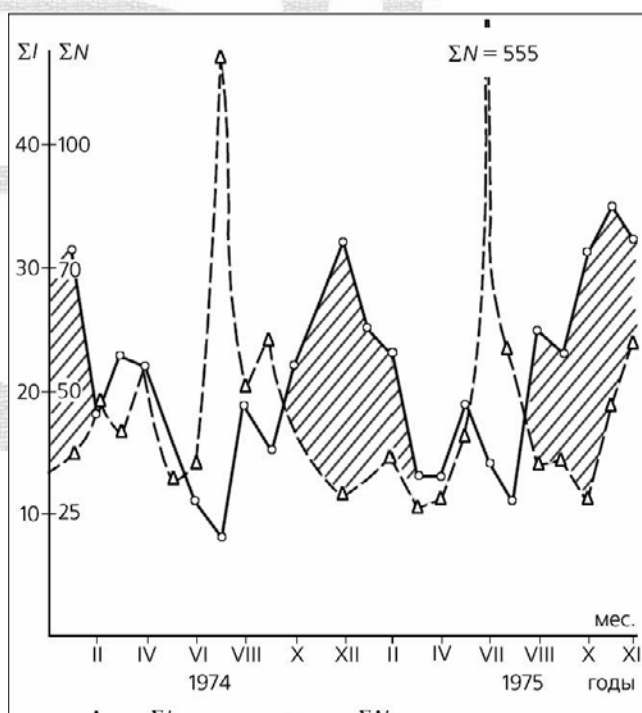


Рис.3. Зависимость количества землетрясений (ΣN) малых энергий ($K=9-11$) за 1974—1975 гг. от интенсивности штормов (ΣI).

Количество землетрясений с 9 по 11 класс ($2,8 < M \leq 3,9$) достигает максимума в тихие месяцы, когда штормы минимальны (рис.4). Для глубины менее 20 км коэффициент корреляции между ΣI и $\Sigma N r_1 = -0,7$, для глубины от 20 до 30 км $r_2 = -0,61$. Если рассматривать землетрясения средних и высоких энергий ($13 < K \leq 16$ и $5,1 < M \leq 6,7$) на участках 1—6 (рис.2),

видно, что в толще земной коры под океаном их значительно меньше, чем на глубинах 30—200 км. Океанические волны, имея широкий спектр частот, создают интенсивные вибрации в верхних горизонтах земной коры и, по-видимому, уменьшают проявление сейсмичности. Энергия микросейсм, переданная дну океана, соизмерима с энергией слабых ($K \leq 12$) землетрясений.

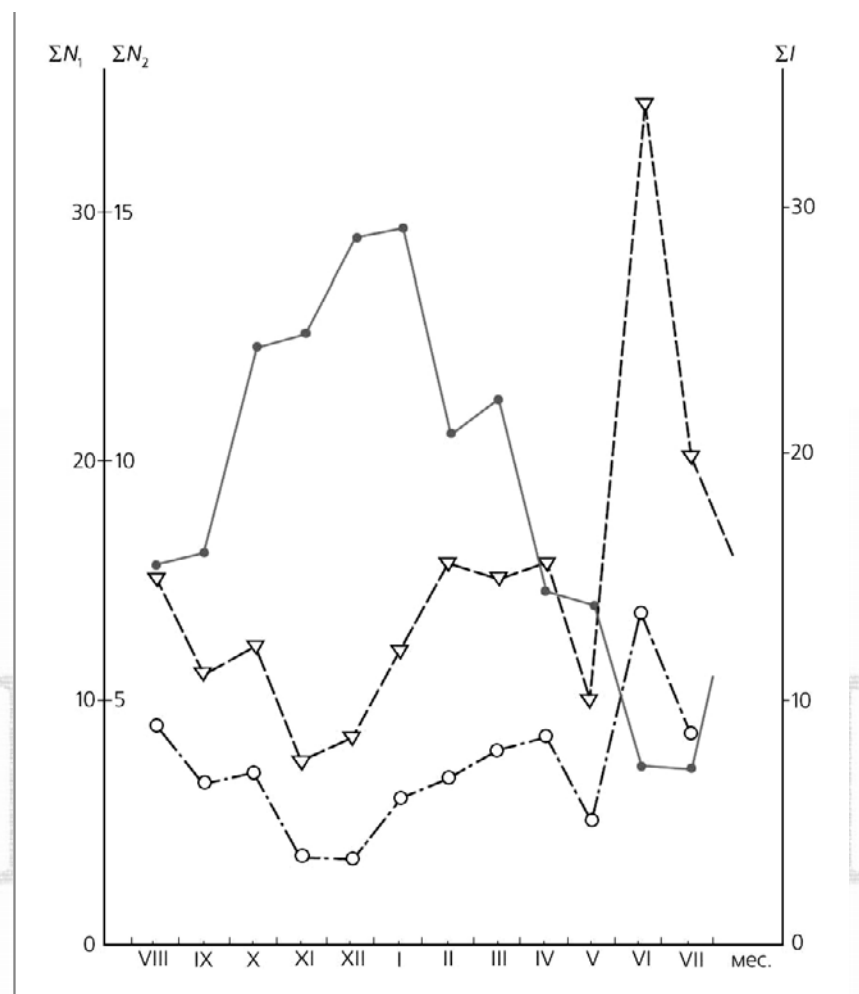


Рис.4. Средняя интенсивность штормовых микросейсм (ΣI) и количество землетрясений (ΣN) малых энергий ($9 \leq K \leq 11$), по данным за 1968—1982 гг. (∇ — ΣN_1 для глубины $h \leq 20$ км; \circ — ΣN_2 для $20 < h \leq 30$ км. ΣI — показано цветной линией.)

Байкал, находящийся в сейсмически активной зоне, может служить идеальной естественной моделью для выявления действия штормовых вибраций на возникновение землетрясений. Озеро, расположенное в центре азиатского континента, казалось бы, не должно подвергаться действию разрушительных ветров, подобных действующим в океанских циклонах и тайфунах. Однако и здесь возникают условия, когда скорость ветра достигает 30—50 м/с. Представим себе, что спокойный атлантический циклон, потеряв свою мощность при движении по лесам континента, перемещается с запада на восток (подобные циклоны нам демонстрируют каждый день по телевидению на картах гидрометеослужбы), на своем пути он встречает препятствия, которые нельзя обойти. Например, циклон спускается вдоль Главного Кавказского хребта и выходит на Каспийское море. Здесь в нем проявляются свирепые свойства тайфуна. Ветер со скоростью более 30 м/с валит с ног людей, срывает с домов крыши и, наконец, падает своей тыловой частью на Каспийское море [8], образуя стоячие волны и микросейсм.

Подобная картина наблюдается и на Байкале, окаймленном горными хребтами со снеговыми вершинами. Следуя своим путем, атлантический циклон встречает на своем пути препятствие из горных возвышенностей и, пересекая их, обрушивается своими воздушными мас-

сами на Байкал. Циклон, падая своей тыловой частью на акваторию, встречает волны зыби. Здесь начинают возникать и развиваться стоячие водяные волны, создаются вибрации дна — микросейсмы. Их записывает сеть сейсмических станций, окружающая озеро (рис.5). Однако в тихие зимние месяцы вся поверхность озера покрыта метровым льдом, и штормовые микросейсмы не могут возникнуть ($\Sigma I = 0$). Контрастную картину представляет собой осеннее время, когда на озере развиваются мощные штормовые процессы и проявляются максимальные вибрации. С гор падают ветры со скоростями свыше 35 м/с. При пересечении циклонами акватории Байкала происходит взаимодействие многометровых волн зыби со встречным горным ветром. Создаются условия возникновения стоячих водяных волн и микросейсм земной коры. В периоды «тишины» количество землетрясений ($8 \leq K < 14$ и $2,3 \leq M < 5,6$), проявившихся в каждый месяц (среднее арифметическое за девять лет), в 2,5 раза больше, чем в штормовую погоду. Коэффициент корреляции между ΣN и ΣI равен 0,77.

Мы показали, что вибрации, действующие на дно озера, сокращают количество землетрясений с гипоцентрами, лежащими непосредственно под акваторией. Будет ли подобный вибратор уменьшать сейсмичность на некотором расстоянии от центра приложения вертикальных сил, вызванных стоячими водяными волнами? Наши наблюдения в береговой зоне Байкала [9] на различных расстояниях от естественного вибратора (байкальских волн) мы ограничили коридорами, окаймляющими озеро по периметру 0—10 км (I), 10—20 км (II) и 20—50 км (III).

Сравнение количества землетрясений проводилось между тихим зимним временем и бурными осенними штормовыми месяцами. Обозначим через n отношение числа землетрясений во время «тишины» (ΣN_T) к числу землетрясений, произошедших во время штормов ($\Sigma N_{ш}$):

$$n = \frac{\Sigma N_T}{\Sigma N_{ш}}$$

Получается, что для землетрясений с 6 по 9 класс для I, II и III коридоров $n = 1,8, 1,3, 2,7$ соответственно, а для 9 и 10 класса — 4, 3 и 2. В береговой зоне в тихое время сейсмичность увеличивается в среднем в 2,4 раза по сравнению со штормовым периодом (рис.6).

Радиус действия вибраций зависит от мощности (W), энергии вибратора (E),



Рис.5. Места расположения сейсмических станций на оз. Байкал.

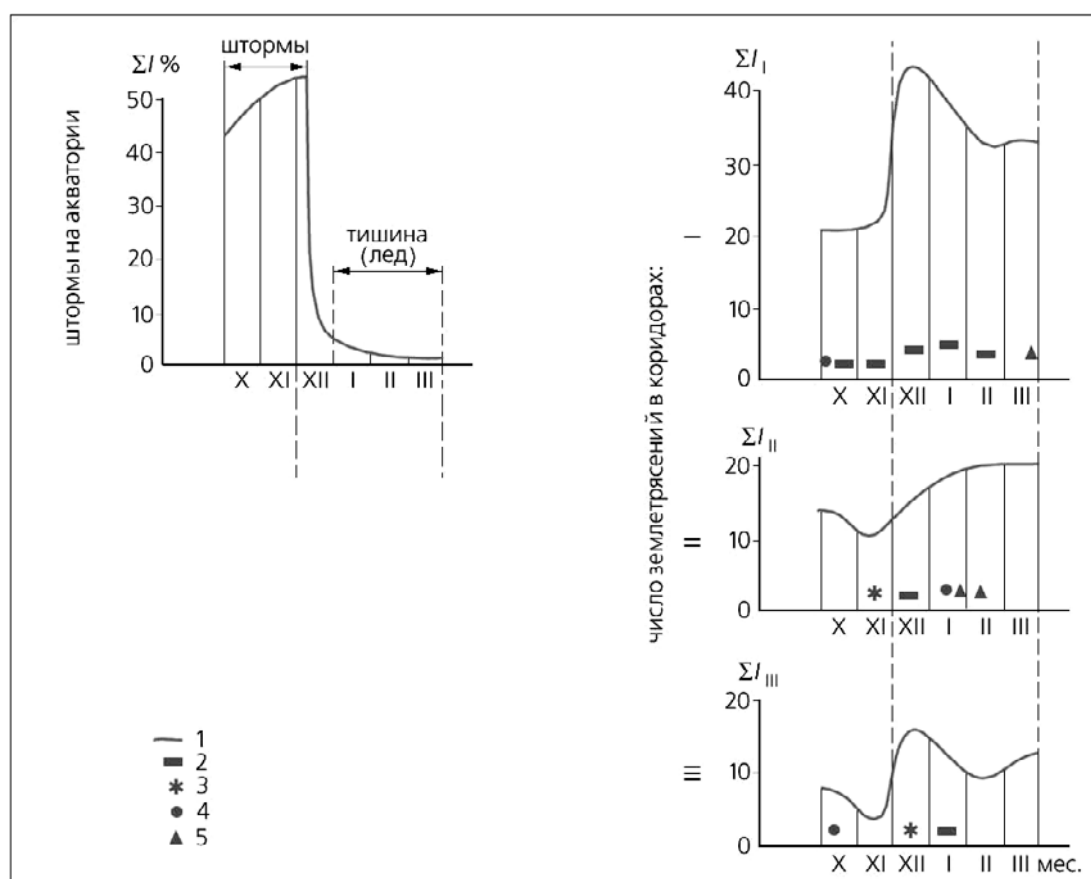


Рис.6. Штормы на Байкале и проявление землетрясений в береговых коридорах (I, II и III). ΣI— количество штормов одного месяца, ΣN— количество землетрясений различных энергетических классов за 1983—1988 гг. 1 — $6 \leq K \leq 9$; 2 — $9 < K \leq 9,5$; 3 — $9,5 < K \leq 10$; 4 — $10 < K \leq 11$; 5 — $11 < K \leq 13$.

спектрального состава колебаний и их затухания. Для фиксированных значений штормов на Байкале при $W = 10^7$ Дж/с, $E = 10^8$ Дж и периодов микросейсм в 2—3,5 с радиус действия вибрации равен 10—30 км для I и 30—80 км для II и III коридоров. Действие вибраций дает наибольший результат под дном акватории и уменьшается по мере удаления от источников колебаний.

Итак, мы получили независимые подтверждения влияния вибраций на сейсмичность для двух различных регионов: оз. Байкал и северо-западной области Тихого океана, восточнее Курильских о-вов. Из полученных результатов наиболее очевидным можно считать уменьшение числа землетрясений $K < 13$ под действием штормов. Эффект снятия сейсмичности определенного класса действовал всегда. Как объяснить это явление? Мы высказали предположение, что имеет место эффект «утряски» дисперсной среды, наподобие того, как объем сыпучего материала уменьшается под влиянием слабого постукивания. Г.А. Соболев предложил теорию лавинного образования трещин, согласно которой первоначально образующиеся малые трещины постепенно перерастают в большие магистральные — первопричины землетрясений [10]. Вибрации, способствуя заполнению малых объемов, тем самым затрудняют возникновение магистральных трещин и соответственно землетрясений средних энергетических классов ($K < 13$). Мы полагаем, что при снятии напряжений возможно действие обоих механизмов.

Можно ли искусственно вызвать вибрации для предотвращения землетрясений среднего класса? Снятие напряжений в земной коре под действием вибраций могло бы принести в дальнейшем новые данные для расчета антропогенного влияния периодических колебаний на

тектонически-активные сейсмические очаги. Нам кажется, что описанные в настоящей статье явления — первый шаг к решению этих вопросов.

Конечно, приведенные здесь закономерности не представляют собой средство борьбы с катастрофическими землетрясениями, но показывают природу их «слабого фланга» и поэтому могут быть полезны в теории прогноза и предотвращения землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Bonington P. *Quest for Adventure*. N.Y., 1990.
- 2 LonguetHiggins M.S. // *Trans. Phil. Roy. Soc.* 1950. V.243A. P.35.
- 3 Табулевич В.Н., Пономарев Е.А., Сорокин А.Г., Дреннова Н.Н. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2001. №2. С.235—244.
- 4 Табулевич В.Н. *Комплексные исследования микросейсмических колебаний*. Новосибирск, 1986.
- 5 Tabulevich V.N. *Microseismic and Infrasound Waves*. Heidelberg, 1992.
- 6 Потапов В.А., Табулевич В.Н., Черных Е.Н. // *Геология и геофизика*. 1997. Т.38. №8. С.1411—1419.
- 7 Ризниченко Ю.В. *Проблемы сейсмологии*. М., 1985.
- 8 Табулевич В.Н. // *Изв. АН СССР. Сер. геофиз.* 1963. №11. С.1667—1675.
- 9 Табулевич В.Н., Дреннова Н.Н., Потапов В.А., Черных Е.Н. // *Геология и геофизика*. 2001. Т.42. №8. С.1271—1278.
- 10 Соболев Г.А. *Основы прогноза землетрясений*. М., 1993.

