



PROBLEMS OF INDUCED SEISMICITY AND ENGINEERING GEOLOGICAL PROTECTION OF RESERVOIRS OF THE BAIKAL-ANGARA CASCADE

K.G. Levi¹, E.A. Kozyreva¹, N.V. Zadonina², V.V. Chechelnskiy³, N.A. Gilyova³

¹*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia*

³*Baikal Division of Geophysical Survey SB RAS, Irkutsk, Russia*

Abstract: The paper presents results of analysis of induced seismicity and changes in processes related to engineering geology in coastal zones of reservoirs of the Baikal-Angara cascade. It is proposed to establish a system for monitoring of geological and geophysical processes in order to avoid disturbances in the modes of operation of large hydro-technical facilities and waterside structures.

Key words: induced seismicity, stresses, variations of water levels of natural and man-made reservoirs, landslides, destruction of banks.

Recommended by K.Zh. Seminsky

Citation: Levi K.G., Kozyreva E.A., Zadonina N.V., Chechelnskiy V.V., Gilyova N.A. 2013. Problems of induced seismicity and engineering geological protection of reservoirs of the Baikal-Angara cascade. *Geodynamics & Tectonophysics* 4 (1), 13–36. doi:10.5800/GT-2013-4-1-0089.

ПРОБЛЕМЫ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ВОДОХРАНИЛИЩ БАЙКАЛО-АНГАРСКОГО КАСКАДА

К.Г. Леви¹, Е.А. Козырева¹, Н.В. Задонина², В.В. Чечельницкий³, Н.А. Гилёва³

¹*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск, Россия*

³*Байкальский филиал ГС СО РАН, Иркутск, Россия*

Аннотация: В работе приводятся результаты анализа проявления наведенной сейсмичности и изменений инженерно-геологических процессов в прибрежных зонах водохранилищ Байкало-Ангарского каскада. Даны предложения по организации на этих территориях мониторинга ряда геолого-геофизических процессов с целью предотвращения нарушений в режиме работы крупных гидротехнических сооружений.

Ключевые слова: наведенная сейсмичность, напряжения, колебание уровня естественных и искусственных водохранилищ, оползни, разрушение берегов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос наличия или отсутствия наведенной сейсмичности на водохранилищах Ангарского каскада ГЭС поднимается не впервые. Известны публикации С.И. Голенецкого [Golenetskii, 1997a, 1997b, 1998], Г.И. Галазия и Б.Ф. Лута [Galazy, Loot, 2000], Г.И. Овчинникова [Ovchinnikov, 2003], В.А. Павленова, Е.Н. Черных [Pavlenov, Chernykh, 2004], Ю.Б. Трзцинского и К.Г. Леви [Trzhtsinskii, Levi, 2009], так или иначе касавшиеся проблемы наведенной сейсмичности и устойчивости гидротехнических сооружений. Ниже мы вернемся к этой проблеме, во многом спорной и неоднозначной, с учетом появления новых наблюдений, в частности сейсмологических. Первоначально мы остановимся на анализе сведений о возможных причинах наведенной сейсмичности на некоторых водохранилищах мира, детальней обзор которых приводится в работах [Gupta, 2002; Gupta et al., 1972; Simpson et al., 1988; Talwani, 1997; Baecher, Keeney, 1982]. Затем рассмотрим проблему наведенной сейсмичности применительно к Байкало-Ангарскому каскаду гидротехнических сооружений, с обзором существующих геоэкологических проблем в районах эксплуатации крупных водохранилищ Восточной Сибири.

Проблема прорыва дамб искусственных водохранилищ. Многочисленные водохранилища, эксплуатируемые в различных странах мира, являются источниками повышенной опасности. Эти опасности возникают по причине заиливания водоемов → повышения уровня

воды → прорыва дамб → наводнения. Все это характерно для водохранилищ, располагающихся на относительно равнинных территориях или побережьях морей. Такие случаи известны в мировой исторической практике и обычно проявляются в результате выпадения аномальных ливневых дождей, бурного таяния снегов и штормовых приливов на морские побережья. Как правило, такие чрезвычайные ситуации сопровождаются большими человеческими жертвами и экономическими потерями (рис. 1). В этой статье мы рассмотрим причины возможных аварий на искусственных водоемах – наведенную и техногенную сейсмичность.

На наш взгляд, следует различать наведенную и техногенную сейсмичность.

Наведенная сейсмичность – возникает в процессе эксплуатации водохранилищ и часто связана с ритмичным воздействием на ложе подъема-снижения уровня воды в бассейне [Ferreira et al., 2008; Meade, 1991]. В табл. 1 приведены некоторые характеристики водохранилищ мира.

Техногенная сейсмичность – обусловлена проведением горных работ с использованием мощных взрывов на осваиваемых месторождениях, особенно вблизи крупных гидротехнических сооружений.

Ледовые удары – возникают при образовании стеновых трещин в ледовом покрове больших водоемов и характеризуются энергетическим классом $K=4-6$, что показано по результатам исследований водных объектов Восточной Сибири [Ruzhich et al., 2009; Dobretsov



Рис. 1. Прорыв дамбы и наводнение от урагана в Нью-Джерси, США, октябрь 2012 г. Изображение заимствовано с сайта: <http://atn.ua/obshchestvo/uragan-prorval-dambu-v-nyu-dzhersi-zatopleny-tri-goroda>.

Fig. 1. The dam broken by flood caused by a hurricane in New Jersey, USA, in October 2012. Image courtesy of <http://atn.ua/obshchestvo/uragan-prorval-dambu-v-nyu-dzhersi-zatopleny-tri-goroda>.

Т а б л и ц а 1. Параметры ряда водохранилищ мира

Table 1. Parameters of several reservoirs of the world

Наименование водохранилища	Страна, год заполнения	Объем, км ³	Высота плотины, м	Наведенная сейсмичность
Нагарджуна Сагар	Индия	0.02	124	Сообщений нет
Вайонт*	Италия, 1959	0.169	262	Сообщений нет
Гранд-Диксенс,	Швейцария, 1957	0.4	284	Сообщений нет
Павловское	Башкортостан, 1958	1.41	12	Есть сообщения (?)
Койна	Индия, 1961	2.78	85	M=6.3–6.9 (11.12.1967 г.)
Карун	Иран, 2005	2.97	205	Сообщений нет
Нурекское	Таджикистан, 1979	10.5	304	Есть
Синьфын	Китай, 1959	11.5	105	M=6.1 (19.03.1962 г.) **
Каиское (р. Кама)	Россия, 1956	12.2	21	
Саратовское	Россия, 1968	12.4	15	
Онежское	Россия, 1952	13.8	17	
Кольмское	Россия, 1983	14.6	117	
«Три ущелья»	Китай, 1998	22	175	
Рыбинское	Россия, 1949	25.4	18	
Итайпу	Бразилия, 1991	29	196	?
Саяно-Шушенское	Россия, 1987	29.1	220	Сообщений нет
Онтарио (Ирокуэй)	Канада, США, 1958	29.9	23	
Глен-Каньон	США	30(?)	178	Сообщений нет
Волгоградское	Россия, 1960	31.4	27	
Мид	Колорадо, США, 1936	35.2	221	M=5.0 (09.1936 г.)
Вилуйское	Якутия, 1972	35.9	68	
Иркутское	Россия, 1958	47.6	30	Возможно есть
Куйбышевское	Россия, 1957	58.0	29	
Усть-Илимское	Россия, 1977	59.4	105	Сообщений нет
Насер	Египет, Судан, 1970	157	95	
Зейское	Россия, 1974	68.4	98	
Красноярское	Россия, 1967	73.3	100	
Вольта	Гана, 1967	148	70	
Кариба	Замбия, Зимбабве, 1963	170	128	M=5.8 (09.1963 г.)
Братское	Россия, 1967	169	105	K=11.2 (08.2002 г.) **
Виктория	Уганда, Танзания, Кения, 1954	205	31	
Дворжак	США, 1973	?	219	
Ингурская ГЭС	Грузия	?	271.5	Не достроена
Альмендра	Испания	?	200	
Кремаста	Греция, 1966	?	160	M=6.3 (05.02.1966 г.)

П р и м е ч а н и е. *Дамба Вайонт – в 1963 г. водохранилище переполнилось и поток воды снес несколько деревень, погубив более 2 тыс. человек, в водохранилище сошел оползень объемом 0.2–0.3 км³, который выплеснул 50 млн м³ воды. По оценкам экспертов, высота волны достигла 250 м. **K – энергетический класс = lgE (E – сейсмическая энергия в Дж), M – магнитуда.

N o t e. *The Vayont dam – the reservoir overflowed in 1963, and the water flow demolished several villages, killing more than two thousand people; a landslide of 0.2–0.3 km³ was consumed by the reservoir, and 50 million m³ of water were splashed out. According to estimations, the wave height reached 250 metres. **K – energy class = lgE (E – seismic energy in Joules), M – magnitude.

et al., 2007, 2011; Psakhie et al., 2008]. Их влияние на устойчивость гидротехнических сооружений пока не установлено.

Для возникновения наведенной сейсмичности на водохранилищах необходимо проявление ряда факторов, действующих одновременно: блоковая тектоника ложа водохранилищ; наличие крутопадающих, больших зияющих и водопроницаемых трещин до глубин 5 км и более; большая скорость подъема и сброса воды; длительный период стояния высоких уровней воды, создающих максимальную нагрузку на ложе; значительные тектонические напряжения, особенности их перераспределения и большие скорости деформаций в ложе бассейна, что детально показано во многих работах, касающихся проявлений наведенной (инициированной) сейсмичности в районах эксплуатации водо-

охранилищ [Kaufmann, Amelung, 2000; Ferreira et al., 1995; Ping, Yuliang, 1992; Kangi, Heidari, 2008; Durá-Gómez, Talwani, 2010]. Опыт показывает, что наведенная сейсмичность начинает проявлять себя при высоте плотины ≥ 90 м; объеме водохранилища ≥ 1 км³. Наиболее яркий эффект наведенной сейсмичности – возникновение землетрясений при заполнении водохранилища Койна в Индии.

2. НАВЕДЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

2.1. ВОДОХРАНИЛИЩЕ КОЙНА, ИНДИЯ

Отдельные параметры водохранилища Койна приведены в табл. 1, случаи проявления наведенной сейс-

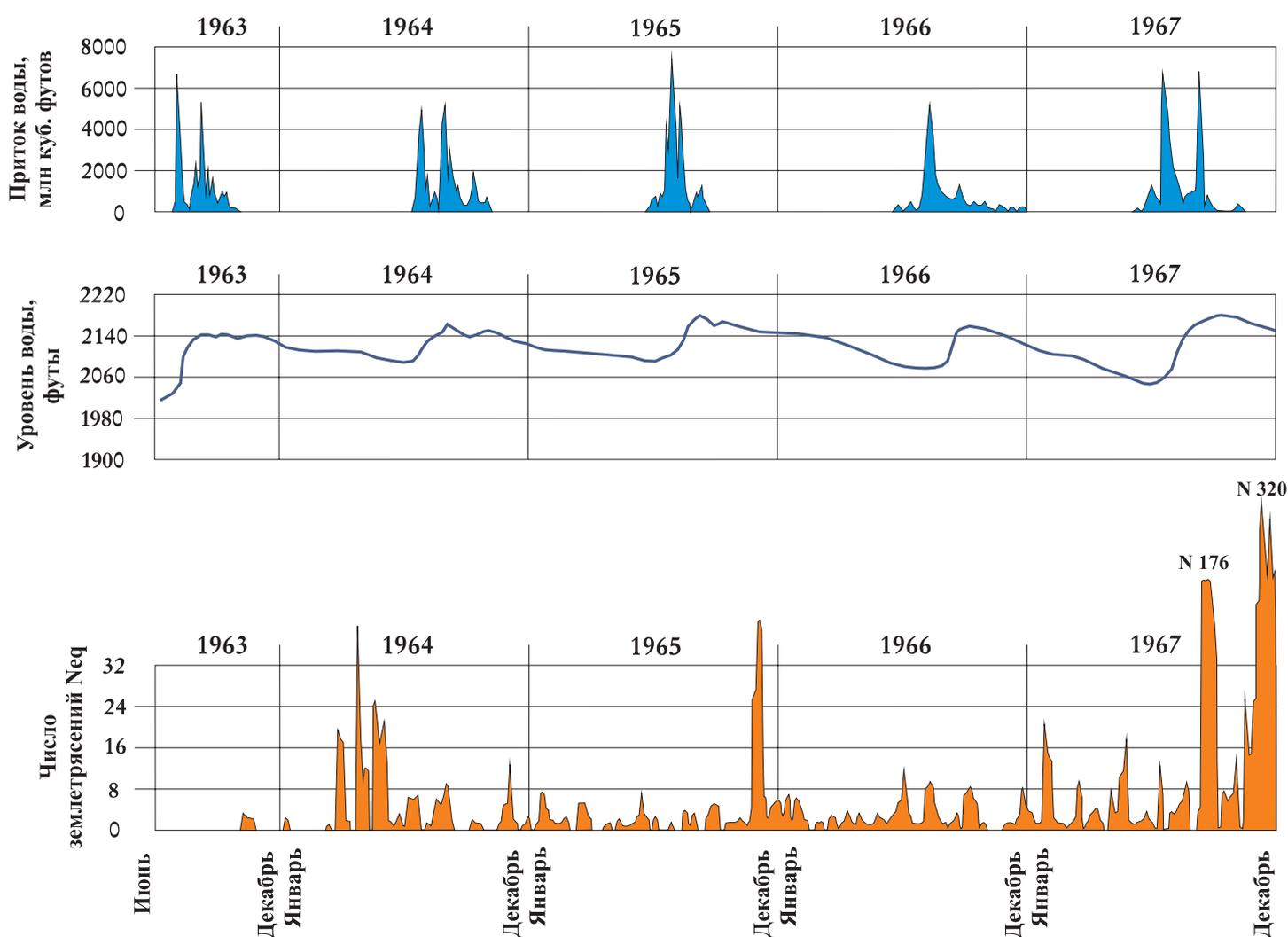


Рис. 2. Вариации притоков, уровня воды и числа землетрясений на водохранилище Койна [Gupta et al., 1969].

Fig. 2. Variations in inflow, water levels, and the number of earthquakes at the Coyne reservoir [Gupta et al., 1969].

мичности в пределах водохранилища освещены в работах [Gupta, 1985, 2002; Gupta et al., 1997].

На рис. 2 отчетливо видны всплески сейсмичности в связи с сезонным выпадением атмосферных осадков, вызывающих резкое увеличение объема воды и нагрузки на ложе бассейна. Хорошо видно, что подъем уровня воды несколько отстает от притока воды вследствие муссонных дождей, а проявление наведенной сейсмичности тяготеет к периодам снижения уровня. Таким образом, подтверждается простая закономерность – в период высокого стояния уровня воды идет интенсивное накапливание напряжений в приповерхностном слое земной коры мощностью, вероятно, до 10 км, а снижение уровня приводит к высвобождению упругой энергии за счет снятия избыточной нагрузки. Днище этого водохранилища, скорее всего, сильно раздроблено, поскольку велико число слабых сейсмических событий, варьирующееся от первых единиц до нескольких сотен (рис. 2).

Во избежание повторения событий, подобных землетрясению 1967 г., на дамбе Койна в 1976 г. был организован геодинамический полигон, на котором проводились геодезические измерения для оценки деформаций поверхности и тела дамбы. Позже геодезическая сеть была заменена на сеть GPS-приемников из 34 единиц. На основании этих измерений был сделан вывод о том, что деформации дамбы тесно коррелируют с изменением уровня воды в водохранилище [Manake, Kulkarni, 2002; Kulkarni et al., 2006].

2.2. НУРЕКСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Расположено на р. Вахш в Таджикистане. Строительство было начато в 1961 г. В эксплуатацию ГЭС введена в 1972 г. Высота плотины составляет 304 м, и она является самой высокой насыпной плотиной в мире. Площадь зеркала водохранилища – 98 км², объем –

10.5 км³, длина – около 70 км. ГЭС расположена в области активной сейсмичности с интенсивностью 8–9 баллов по шкале МСК-64. Отсюда следует, что эта область является весьма подвижной в тектоническом отношении и потому наполнение водохранилища привело, согласно [Osipov, 1996], к активизации наведенной сейсмичности [Simpson, Negmatullaev, 1981; Keith et al., 1982]. На рис. 3 видно, что подъем уровня воды ведет к относительному повышению числа землетрясений, но из-за повышенного сейсмического фона трудно сказать, какое действительное число землетрясений являются наведенными. Иными словами, здесь мы наблюдаем некоторое сходство с водохранилищем Койна, но лишь с той разницей, что Нурекское расположено в более спокойном в сейсмическом отношении районе.

3. СЕЙСМИЧНОСТЬ БАЙКАЛО-АНГАРСКОГО КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ

Байкало-Ангарский каскад включает в себя собственно оз. Байкал, а также Иркутское, Братское, Усть-Илимское и Богучанское водохранилища. Главным источником их водообеспечения является бассейн оз. Байкал и потому необходимо коротко остановиться на некоторых его характеристиках.

Озеро Байкал – один из крупнейших пресноводных бассейнов Мира, имеет протяженность 620 км при ширине, варьирующейся от 24 до 80 км. Максимальная глубина озера 1642 м. Объем водной массы составляет 23615.39 км³. Водосборный бассейн озера составляет 557 тыс. км² и охватывает обширные пространства Бурятии, Забайкальского края и Северной Монголии, а вытекает из него только р. Ангара, которая и была в свое время выбрана для строительства Ангарского каскада ГЭС. До строительства Иркутской ГЭС сток из озера был крайне неравномерным, что нередко приводило к сезонным паводковым и зимним наводнениям. Колебания уровня озера восстановлены с 1747 г. [Afanasyev, 1976] (рис. 4), а измерения уровня озера производились относительно его средней многолетней высоты 119 см и являются относительными.

Относительно высокие уровни озера отмечались в 1752, 1783, 1790, 1827, 1868 гг. Наиболее катастрофичным оказался 1868 г., и, как сообщают хроники, грандиозные наводнения на реках водосборного бассейна оз. Байкал были связаны с повышенной дождевой активностью. Ничего подобного позже не наблюдалось, а до того – неизвестно. Интересен к тому же и тот факт, что в 1867–1868 гг. солнечная активность была в минимуме в преддверии высокого максимума 1870 г., а перепад между минимумом и максимумом составил почти 132 единицы *W* и произошел всего за три года. С 1900 г. измерения высоты стояния уровня озера производились (или были пересчитаны) в абсолютных высотах, что и представлено на рис. 5.

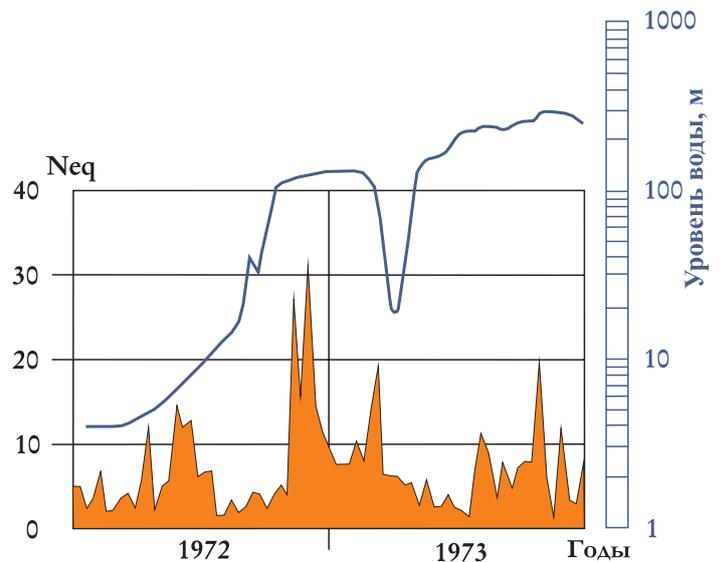


Рис. 3. Вариации числа землетрясений *Neq* (оранжевое поле) и изменение высоты уровня водохранилища (темно-серая кривая), м [Osipov, 1996].

Fig. 3. Variations in the number of earthquakes *Neq* (orange fill), and changes of the water level in the reservoir (dark grey curve), m [Osipov, 1996].

Фурье-анализ ряда наблюдений за уровнем озера показал наличие гармоник с продолжительностью – 13–14, 20–25, 30–35, 49–50, 82 и 120–125 лет [Levi et al., 2003]. Надо также отметить, что кроме сезонного повышения уровня воды на напряженно-деформированное состояние коренных пород ложа озера влияют сейши и штормовые погоды (рис. 6) [Chizhevsky, 1976], которые приводят к кратковременному перераспределению нагрузки на ложе бассейна, тем самым усиливая эффект напряжений. Изучение микросейсм на Тихом океане и оз. Байкал [Potapov et al., 1997] показало, что в периоды активного проявления штормовой погоды происходит снижение уровня сейсмической активности. Усиление сейсмической активности по числу ощутимых землетрясений происходит с периодами 10–15, 20–25, 40–55, 95–100 лет, а по объему выделившейся сейсмической энергии – 20, 45, 70, 90 и 120 лет [Levi et al., 2003]. Значения периодов изменения уровня воды в озере и периоды изменения сейсмической активности обнаруживают некоторое сходство. Таким образом, перечислив некоторые принципиальные условия природной среды, можно перейти к влиянию уровня озера на возникновение условно наведенных землетрясений.

На рис. 4 и 5 видно, что заметные снижения уровня озера наблюдаются в периоды высокой солнечной активности.

Нижняя кривая на рис. 5 дает представление о развитии сейсмического процесса в Прибайкалье. Устойчивой связи сейсмичности с колебаниями уровня озера

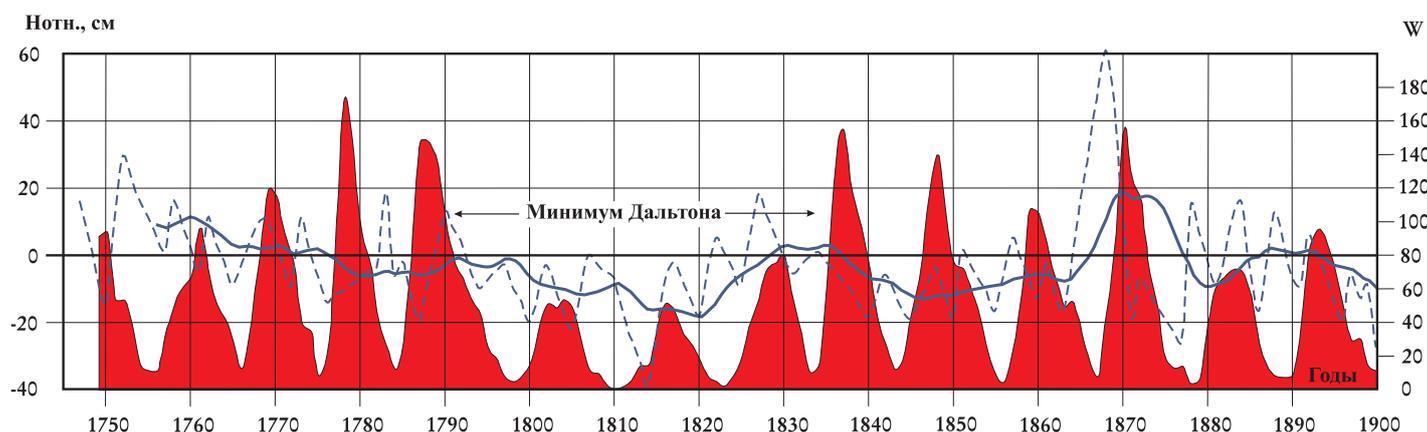


Рис. 4. Колебания уровня оз. Байкал в 1747–1900 гг.: штрих-пунктир – оригинальная кривая относительных высот стояния уровня (Нотн., см) [Afanasiev, 1976]; утолщенная кривая – колебания уровня, сглаженные 10-летним окном; красная фоновая кривая – вариации солнечной активности в числах Вольфа (W).

Fig. 4. Variations of the Lake Baikal water level in 1747–1900. Dashed line – the original curve showing water levels (Нотн., см) [Afanasiev, 1976]; thick curve – water level variations averaged in the 10-year window; red background curve – solar activity variations (in Wolf numbers, W).

не просматривается, так как основная масса происходящих здесь землетрясений носит первично тектонический характер, но отрицать возможность возникновения наведенных землетрясений нельзя. Идея о том, что такая связь может быть, была высказана Б.Ф. Лутом еще в 80-х годах прошлого века, но у научной общественности поддержки не получила. Позже высказанная им гипотеза была опубликована [Galazy, Loot, 2000]. В этой работе авторы приводят сведения о высоком стоянии уровня озера в 1380, 1450, 1515, 1575, 1650, 1680, 1715, 1785, 1824, 1869, 1908 и 1932 гг. Эти даты были получены методом дендрохронологии – методом надежным, но в данном контексте даты не коррелируют с приведенными выше на рис. 4, а сами древеснокольцевые хронологии не приводились. Можно лишь на веру принять сведения о высоком стоянии уровня озера в 1380, 1450, 1515, 1575, 1650, 1680, 1715 гг., а в более поздних датах этого же ряда есть явные пропуски событий. В статье указывается, что изменения нагрузки на днище озера могут влиять на возникновение землетрясений, подобных наведенным. Так, в этой публикации сообщается, что в 1768, 1824, 1869, 1908 и 1959 гг., когда отмечался существенный подъем уровня воды в озере, произошли землетрясения интенсивностью свыше 7 баллов. Возможно, это так и было, но объяснять возникновение мощных сейсмических событий только высоким стоянием уровня воды в оз. Байкал, наверное, не стоит. Проблема наведенной сейсмичности в районе оз. Байкал освещается в работах П.Г. Дядькова, где рассматривается корреляционная зависимость вызванной сейсмичности от скорости повышения уровня воды в оз. Байкал [Dyad'kov, 2003]. Судя по рис. 5 (нижний график), сейсмические активизации отмечаются чаще при переходе от высокого стояния уровня озера к низкому, и это можно объяс-

нить – при высоком стоянии уровня в коренные породы закачивается избыточная энергия, которая высвобождается при быстром понижении уровня воды. Что же касается сейсмичности 1867–1870 гг., когда здесь было отмечено грандиозное повышение уровня озера, сибирские хроники сообщают, что в Прибайкалье землетрясения ощущались в 1867 г. – 5 раз; в 1868 г. – 5 раз, причем одно значительное в марте; в 1869 г. – 7 раз и два из них довольно значительные; в 1870 – 2 раза, причем одно из них летом, судя по описанию, 6-7 баллов [Levi, Zadonina, 2012]. Таким образом, наверное, можно допускать наличие наведенных сейсмических событий под акваторией оз. Байкал, но, вообще говоря, сейсмичность в Прибайкалье носит, прежде всего, тектонический характер, и выделить так называемые наведенные события сегодня не представляется возможным.

3.1. ИРКУТСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

Строительство Иркутской ГЭС началось в 1950 г. и было закончено в 1958 г. Первоначальное заполнение водохранилища осуществлялось в течение семи лет. В зоне затопления и подтопления *Иркутского водохранилища* оказалось 138.6 тыс. га, в том числе 32.3 тыс. га земель сельскохозяйственного назначения, более 200 населенных пунктов, участок шоссейной дороги Иркутск–Листвянка и часть Кругобайкальской железной дороги (участок Иркутск–Михалево–Подорвиха–Байкал). Из зоны затопления было перенесено 3.3 тыс. дворов и переселено 17 тыс. человек. По проекту полезный объем ангарской части водохранилища составлял 2.5 км³, тогда как объем байкальского участка – 46.4 км³. По сравнению с первоначальными границами изменения уровня высота сработки от нормального

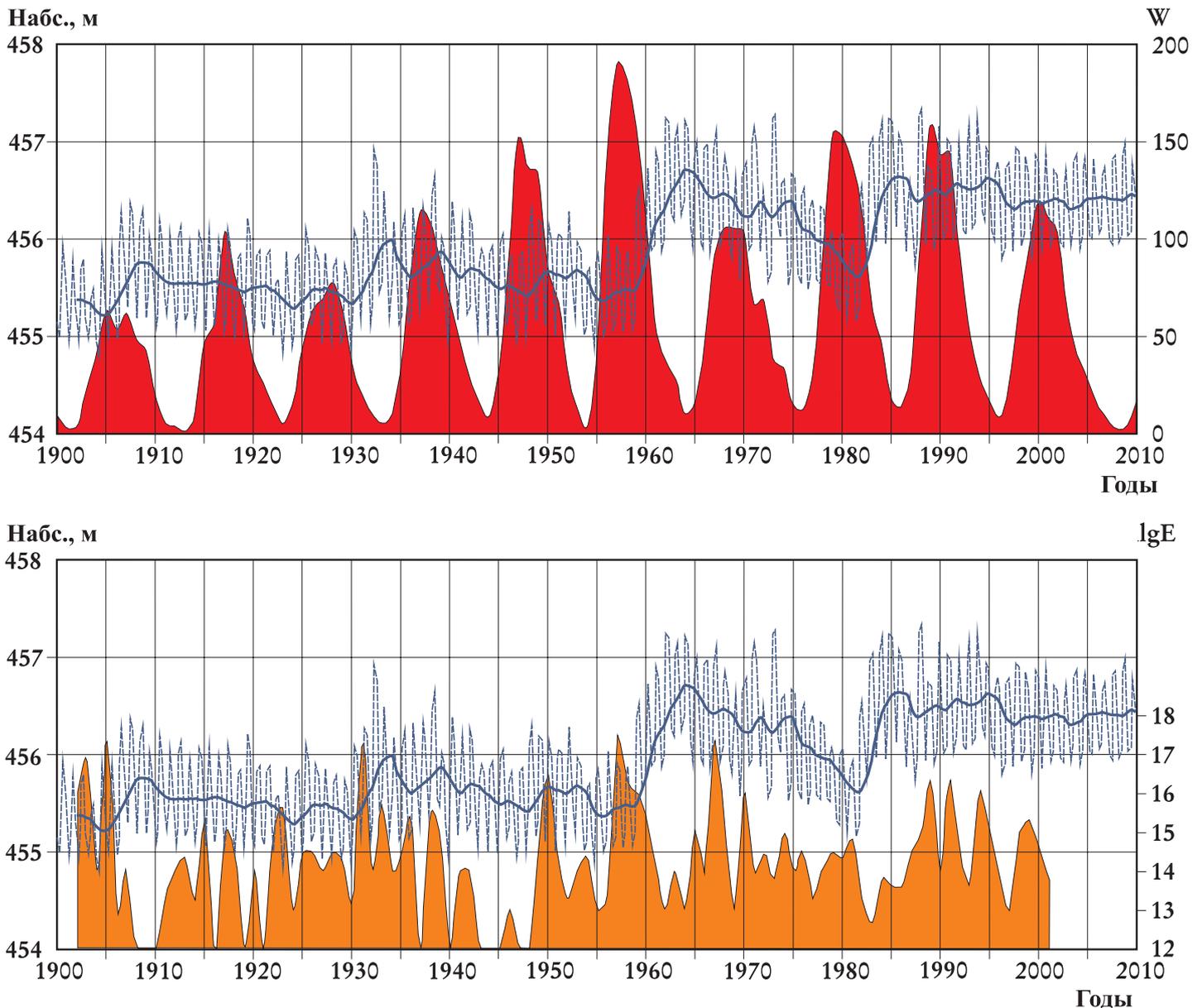


Рис. 5. Колебания уровня оз. Байкал в 1900–2010 гг.: штрих-пунктир – оригинальная кривая на обоих рисунках; красная фоновая кривая – вариации солнечной активности в числах Вольфа (W), а на нижнем рисунке – $\lg E$, логарифм суммарного объема выделившейся сейсмической энергии [Zadonina, 2007].

Fig. 5. Variations of the Lake Baikal water level in 1900–2010. Dashed line – the original curve in both figures; red background curve – solar activity variations (in Wolf numbers, W); bottom figure – $\lg E$, the logarithm of the total amount of seismic energy released [Zadonina, 2007].

подпорного уровня (НПУ) была уменьшена на 0.5 м и на 2009 г. составляла 1 м.

Водохранилище располагается в относительно спокойной тектонической обстановке, следует лишь отметить, что по долине р. Ангары в северо-западном направлении протягивается Ангарский разлом. Его сейсмический потенциал не известен, но для ряда байкальских землетрясений он является своеобразным волноводом, обеспечивающим распространение сейсмических колебаний на большое расстояние (рис. 7).

Сейсмические события до 1973 г. здесь не фиксировались из-за отсутствия достаточного количества

сейсмических станций, и поэтому мы располагаем неполным каталогом землетрясений, произошедших в акватории водохранилища в 1973–2011 гг. (табл. 2). За восьмилетний период эксплуатации здесь произошло только 9 событий. Можно лишь предположить, что наведенная сейсмичность в Иркутском водохранилище может проявляться.

Наведенная сейсмичность, если она здесь проявляется, о чем также говорил в своих работах С.И. Голенецкий [Golenetskii, 1997a, 1997b, 1998], характеризуется событиями 6–7-го энергетического класса (табл. 2), а по часам суток распределяется хаотично (рис. 8).

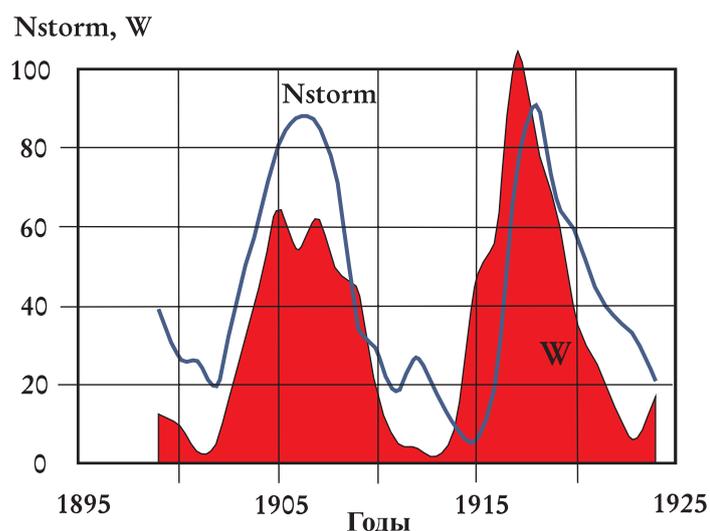


Рис. 6. Соотношение числа дней со штормовой погодой на оз. Байкал (N_{storm}) и солнечной активности (W) [Chizhevsky, 1976].

Fig. 6. Ratio of the number of stormy days at Lake Baikal (N_{storm}) and solar activity (W) [Chizhevsky, 1976].

Внутригодовые колебания уровня воды в Иркутском водохранилище зависят от изменения уровня на оз. Байкал, режима работы самой Иркутской ГЭС и наполнения водохранилищ Ангарского каскада. Уровень воды в водохранилище характеризуется плавным повышением до отметок, близких к НПУ, в мае–августе, а максимум наблюдается в сентябре–октябре. Понижение уровня наблюдается в декабре–марте в период ледостава. Минимальные высоты уровня наблюдаются в апреле–мае. Аномально низкий уровень водохранилища был отмечен в апреле 1980 г. и составил 452.02 м, а аномально высокий – в октябре 1962 г. – 456.82 м. Суточные колебания уровня на водохранилище контролируются изменениями режима работы Иркутской ГЭС. Здесь, так же как и на оз. Байкал, наблюдаются сейши, приводящие к перекосу зеркала водоема и, естественно, перераспределению давления воды на ложе водоема.

Из рис. 9 следует, что только в двух случаях условно наведенные землетрясения совпали с максимумом солнечной активности, остальные же ложатся на периоды спада или роста солнечной активности, а два произошли в минимуме. Интересен и тот факт, что аномально низкое стояние уровня пришлось на максимум солнечной активности 1980 г., а аномально высокое – на минимум солнечной активности 1962 г.

3.2. БРАТСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Плотина Братской ГЭС (Восточная Сибирь) была построена в 1961 г., заполнение водохранилища закончилось в 1967 г. Площадь водной поверхности колеблется от 5426 до 5470 км², а объем достигает 169 км³.

Полезный объем водохранилища составляет 35.41 км³, средняя глубина – 31 м, изменение уровня при сработке от НПУ – 7.08 м. Береговая линия, длиной около 7400 км, сильно изрезана, в месте впадения крупных рек – Ангары, Оки, Ии и других – образовались длинные заливы. Ширина водохранилища превышает 20 км.

Братское водохранилище располагается в относительно спокойных сейсмотектонических условиях. Правда, долина р. Ангары на отдельных ее отрезках заложена непосредственно в зонах значительных по протяженности тектонических разломов. Особенности проявления наведенной сейсмичности на Братском водохранилище обусловлены общей тектонической обстановкой в окрестностях плотины и наличием в акватории, как мы уже упомянули, активных разломов, способных генерировать сейсмические события. Регулярный каталог землетрясений начал составляться только в 1972 г., то есть через пять лет после завершения его наполнения. Здесь, как и в предыдущем случае, мы опять сталкиваемся с потерей информации на достаточно значимом промежутке времени. В работе [Trzhtsinskii, Levi, 2009] предполагалось, что активизация экзогенных процессов в окрестностях Братского водохранилища связана с наведенной сейсмичностью, но, как выяснилось сегодня, наведенная сейсмичность здесь скорее сейсмичность техногенная, вероятно, обусловленная промышленными горнотехническими взрывами. В упомянутой работе верным было лишь то, что сейсмические колебания в среде с повышенной влажностью могут вызывать негативные последствия в геологической среде (рис. 10). В таблице 3 приведены характеристики произошедших в окрестностях Братского водохранилища сейсмических событий.

Более того, из серии зарегистрированных событий,



Рис. 7. Иркутское водохранилище. Изображение заимствовано из программы: Google Earth.

Fig. 7. The Irkutsk reservoir. Image from Google Earth.

Таблица 2. Хронология землетрясений, произошедших в Иркутском водохранилище в 1973–2011 гг.

Table 2. Chronology of earthquakes in the Irkutsk reservoir from 1973 to 2011.

№ п/п	Время землетрясения			Координаты		К
	год	месяц	день	φN	λE	
1	1973	5	10	52.19	104.45	7
2	1981	1	31	52.39	104.28	7
3	1983	2	7	52.27	104.47	7
4	1983	6	11	52.48	104.37	6
5	1999	2	17	52.21	104.33	6.8
6	2002	5	26	52.23	104.38	5.9
7	2003	3	20	52.26	104.32	6.2
8	2009	6	19	52.45	104.31	6.9
9	2010	11	25	52.35	104.21	7.1
10	2011			НЕТ		

вероятно, большая часть наведенными землетрясениями не являются. Это скорее промышленные взрывы, которые с начала 90-х годов регистрируются в соответствующих государственных инстанциях не регулярно, а отличить их на записях сейсмостанций не всегда удается. В пользу этого свидетельствует тот факт, что эти так называемые наведенные землетрясения происходят в большинстве своем примерно в одни и те же часы суток (рис. 11).

Техногенные землетрясения по своим энергетиче-

ским классам варьируются в узком диапазоне $K=6.9-9.2$. На рис. 12, А, размещен график, отражающий распределение числа техногенных сейсмических событий и их энергии по годам. Если допустить, что все сейсмические события в районе Братского водохранилища являются техногенными, то этот график отражает скорее вариации хозяйственной активности расположенных здесь горнопромышленных предприятий, а выдержанность энергетических классов говорит о том, что во многих случаях использовались заряды при-

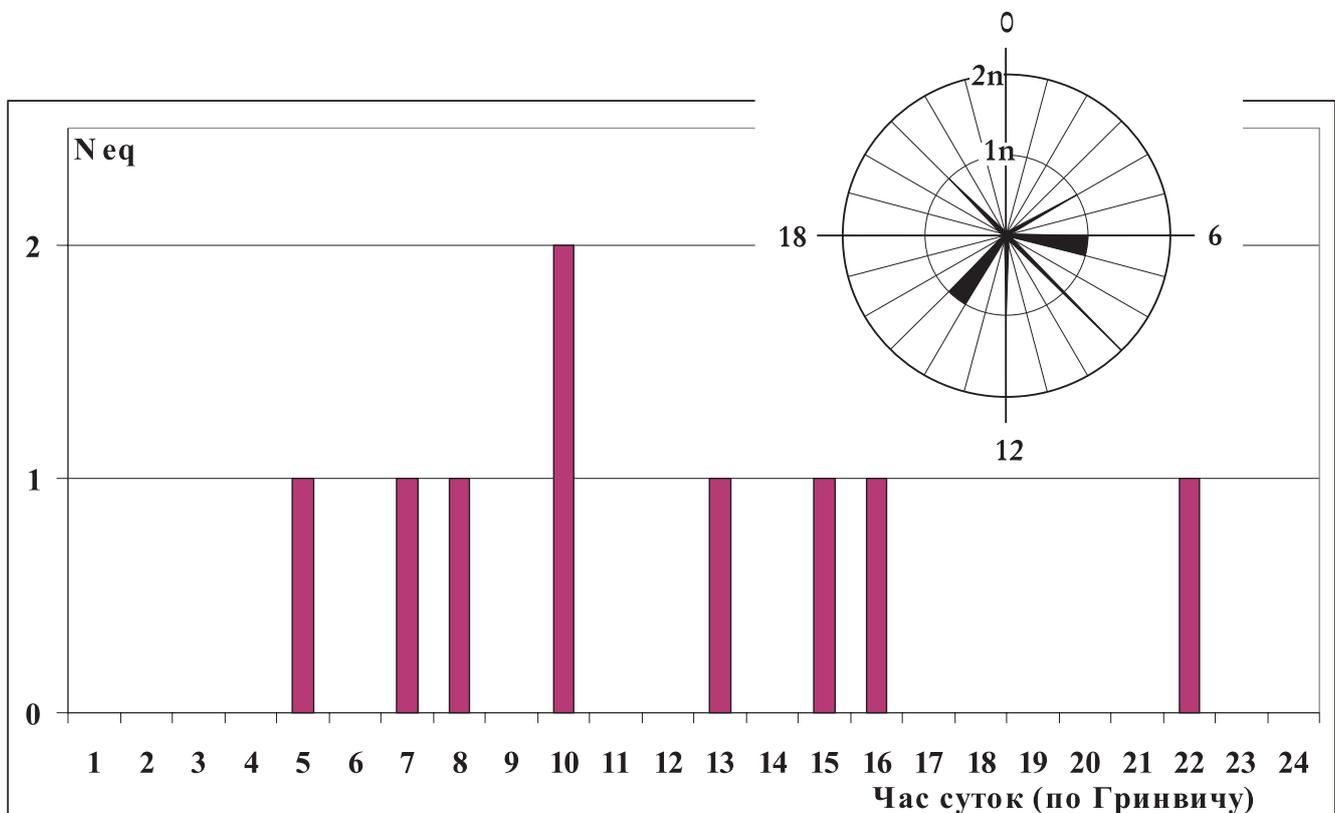


Рис. 8. Распределение числа наведенных землетрясений N_{eq} по часам суток (время по Гринвичу). Иркутское водохранилище.

Fig. 8. The Irkutsk reservoir. Distribution of the number of induced earthquakes (N_{eq}) in 24 hours (GMT).

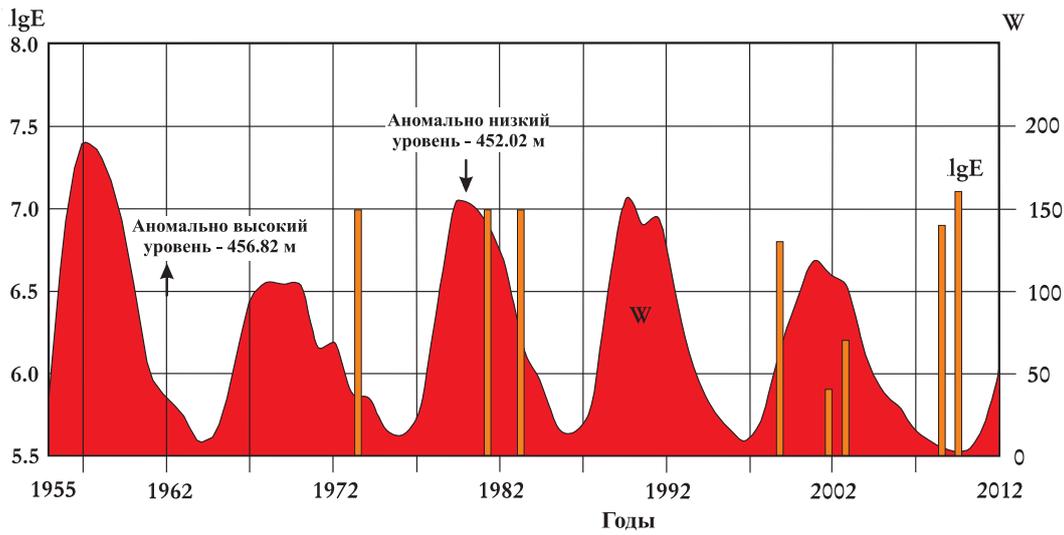


Рис. 9. Вариации выделившейся упругой энергии (lgE) (гистограмма наведенных землетрясений); вариации солнечной активности в числах Вольфа (W), фоновая заливка.

Fig. 9. Variations of released elastic energy (lgE) (histogram of induced earthquakes); solar activity variations in Wolf numbers (W), background shading.

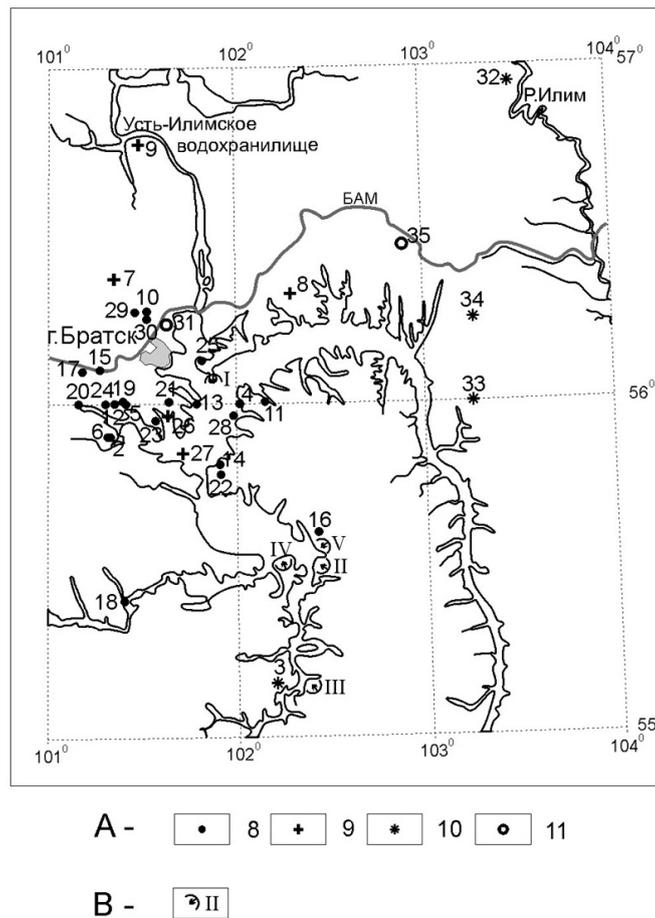


Рис. 10. Схема эпицентров сейсмических событий (техногенных и наведенных землетрясений) в зоне влияния Братского водохранилища. А – номер эпицентра (табл. 3) и энергетический класс землетрясений; В – оползневые участки: I – Монастырский, II – Омский, III – Имбейский, IV – Стрелкинский, V – Аргумейский.

Fig. 10. The scheme of epicenters of seismic events (technogenic and induced earthquakes) in the zone impacted by the Bratsk reservoir. A – epicentre's number in Table 3 and energy class of earthquake; B – landslide areas: I – Monastyrsky, II – Omsky, III – Imbeysky, IV – Strelkinsky, V – Artumeysky.

Т а б л и ц а 3. Хронология землетрясений, произошедших в районе Братского водохранилища в 1972–2005 гг.

Table 3. Chronology of earthquakes in the area of the Bratsk reservoir from 1972 to 2005.

№ п/п	Время землетрясения			Координаты		К
	год	месяц	день	φN	λE	
1	1972	12	2	56.37	101.07	8.0
2	1973	7	24	55.88	101.32	8.0
3	1977	2	3	55.16	102.19	10.0
4	1978	4	5	56.10	102.10	8.0
5	1979	2	26	56.00	101.40	8.0
6	1979	3	28	55.90	101.30	8.0
7	1979	6	28	56.37	101.35	9.0
8	1979	6	30	56.35	102.28	9.0
9	1980	9	25	56.78	101.48	9.0
10	1981	9	1	56.27	101.52	8.0
11	1982	1	19	56.10	102.15	8.0
12	1982	2	24	56.01	101.36	8.0
13	1982	4	28	56.00	101.78	8.0
14	1983	2	23	55.81	101.89	8.0
15	1983	4	13	56.09	101.28	8.0
16	1983	8	17	55.59	102.42	8.0
17	1986	6	18	56.10	101.18	8.0
18	1986	7	2	55.40	101.43	8.0
19	1987	4	28	56.02	101.36	8.2
20	1987	7	7	56.00	101.15	8.0
21	1987	11	26	56.04	101.63	8.3
22	1988	5	10	55.80	101.92	7.9
23	1989	1	18	55.95	101.58	8.1
24	1989	3	22	56.03	101.32	7.5
25	1989	3	25	56.13	101.82	8.0
26	1992	2	27	55.95	101.63	8.8
27	1992	3	24	55.84	101.72	8.8
28	1992	8	6	56.01	102.09	8.6
29	1992	8	27	56.28	101.45	8.6
30	1992	12	16	56.00	101.75	8.5
31	1993	12	23	56.25	101.52	8.2
32	1996	2	26	56.23	102.62	11.6
33	1997	5	4	56.94	103.48	10.0
34	2000	3	24	56.30	101.1	8.2
35	2000	9	15	56.60	102.57	8.4
36	2001	2	13	56.20	101.85	7.7
37	2001	4	5	55.90	102.34	7.5
38	2001	6	29	56.30	101.71	8.1
39	2002	3	13	56.2	101.77	8.2
40	2002	7	12	56.2	101.99	8
41	2002	8	5	55.3	101.57	7.4
42	2002	8	6	56.1	101.99	8.1
43	2002	8	9	56.00	103.25	10.4
44	2002	8	9	56.25	103.26	10.4
45	2002	8	9	56.49	102.90	11.2
46	2002	10	4	54.05	101.30	8.8
47	2003	2	7	55.7	103.11	7.1
48	2003	9	16	55.9	101.72	7.2
49	2004	4	8	56.1	101.96	7.7
50	2004	12	3	55.6	101.44	6.9
51	2005	1	31	56.38	101.22	8.0
52	2005	7	13	56.08	101.43	7.9
53	2007	12	15	56.25	101.81	9.1
54	2008	9	29	55.62	101.26	8.0
55	2009	4	15	55.92	102.87	7.7
56	2009	4	16	56.00	102.92	8.0
57	2009	4	16	56.00	102.87	9.2
58	2009	4	16	56.04	102.84	8.5

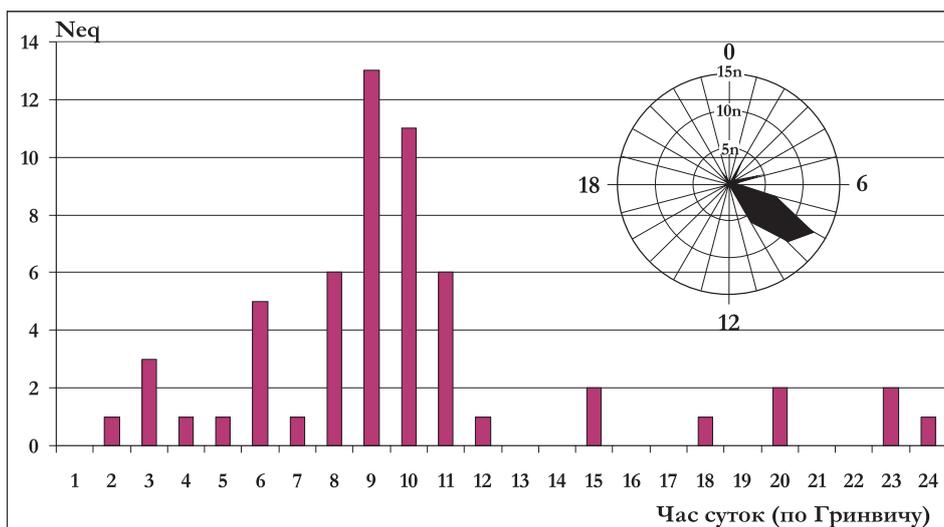


Рис. 11. Братское водохранилище. Распределение числа «техногенных» землетрясений Neq по часам суток (время по Гринвичу).

Fig. 11. The Bratsk reservoir. Distribution of the number of 'technogenic' earthquakes (Neq) in 24 hours (GMT).

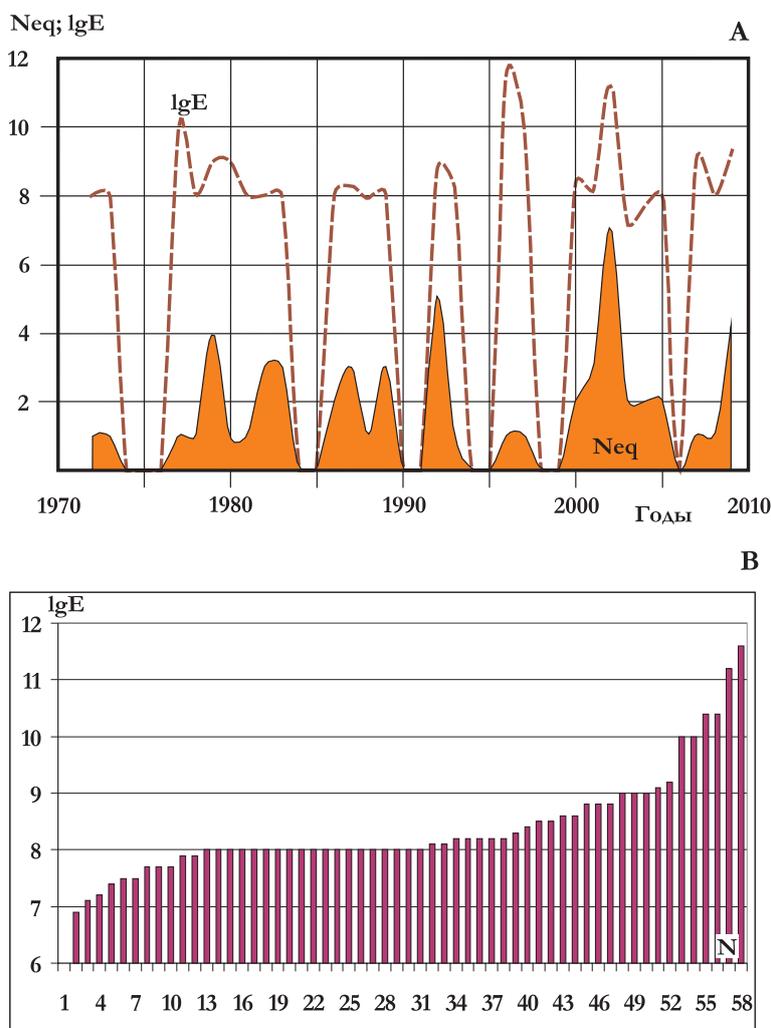


Рис. 12. Техногенные землетрясения. А – распределение числа техногенных сейсмических событий (Neq) и их суммарной энергии (lgE) по годам; В – распределение сейсмических событий по возрастанию K.

Fig. 12. Technogenic earthquakes. A – distribution of the number of technogenic seismic events (Neq) and their total energy (lgE) by year; B – distribution of seismic events in increasing K.

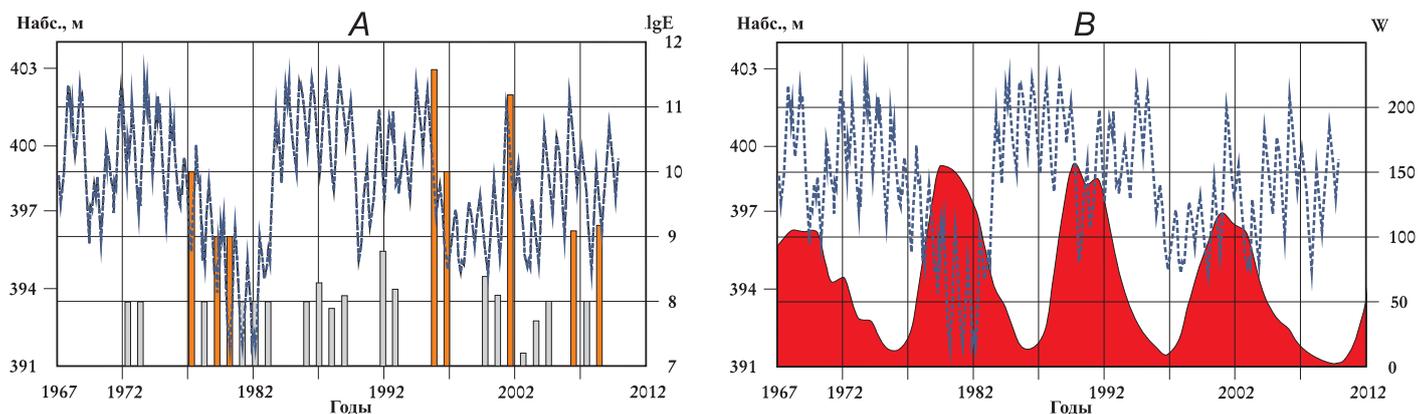


Рис. 13. Колебание уровня воды в водохранилище (пунктир, материалы Гидрометеослужбы). А – вариации выделившейся упругой энергии (lgE) (гистограмма техногенных событий и наведенных землетрясений); В – вариации солнечной активности в числах Вольфа (W), фоновая заливка.

Fig. 13. Variations of water level in the reservoir (dotted line, data from the Meteorological Agency). А – variations of released elastic energy (lgE) (histogram of technogenic events and induced earthquakes); В – solar activity variations in Wolf numbers (W), background shading.

мерно близкой мощности. Рис. 12, В отражает распределение событий по возрастанию их энергетического класса. Видно, что на фоне относительно слабых событий резко обособляются события энергетических классов 10.0–11.6. Возможно, именно они и являются действительно наведенными землетрясениями. Конечно, это только предположение, но мы попытаемся подтвердить это на графических материалах ниже.

Вариации колебаний уровня воды в Братском водохранилище носят относительно регулярный характер, что определяется, с одной стороны, техническими условиями его эксплуатации в ходе работы ГЭС, а с другой – природными условиями. На рис. 13 приведены кривые, характеризующие состояние водохранилища в 1967–2010 гг.

При анализе рис. 13, А, мы не будем принимать в расчет все события энергетического класса ≤ 9 включительно, считая их техногенными, а события энергетического класса ≥ 9 будем рассматривать в качестве наведенных землетрясений, возникающих в результате эксплуатации водохранилища Братской ГЭС.

Из анализа кривых на рис. 13 следует, что наведенная сейсмичность проявляется в периоды относительно низкого стояния уровня водохранилища или на фоне его быстрого понижения. Вероятно, упругая энергия накапливается при возрастании массы воды в резервации и высвобождается при быстром снятии нагрузки на ложе водоема (рис. 13, А). На рис. 13, В, видно, что низкое стояние уровня водохранилища связано не только с техническими условиями сработки воды Братской ГЭС, но и с вариациями солнечной активности, которая контролирует погодные условия в области водохранилища. Нечто подобное мы наблюдаем и на оз. Байкал. Напомним, что высокая солнечная активность способствует увеличению числа дней со

штормовой погодой на озере [Chizhevsky, 1976], а штормовая погода снижает природную сейсмическую активность по числу событий 9–11-го энергетического класса [Potapov et al., 1997].

Таким образом, наведенная сейсмичность – весьма интересное и опасное явление, нуждающееся в пристальном внимании и детальном изучении, поскольку ее закономерности носят объективно утилитарный характер – мало построить грандиозную плотину ГЭС, но нужно обеспечить и безопасность ее эксплуатации.

Однако эксплуатация водохранилищ сопровождается не только наведенной сейсмичностью, но и нарушением нормального развития экзогеодинамических процессов. Коротко остановимся на этом вопросе.

4. ЭКЗОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Озеро Байкал. Инженерно-геологические условия побережий озера отличаются сложностью, а их развитие отчасти стимулируется повышенной сейсмичностью региона. В бортах наблюдается широкое развитие неоген-четвертичных озерных, речных, пролювиальных и ледниковых отложений. Широкое развитие здесь получили абразионные, оползневые, селевые и обвальные процессы. Их проявление связано с особенностями волноприбойной деятельности озера и неустойчивыми погодно-климатическими условиями [Imetkhenov, 2009]. Особенно широко оползни проявлены на Танхойском поле (юго-восточное побережье) и в дельте р. Селенги. Ушедшие под воду большие оползни образовали серию однотипных заливов–соросов Посольский, Истокский, Инкинский, Провал и др. Оползанию способствует ритмичное песчано-глинистое строение осадочных пород. На о-ве Ольхон в поле раз-

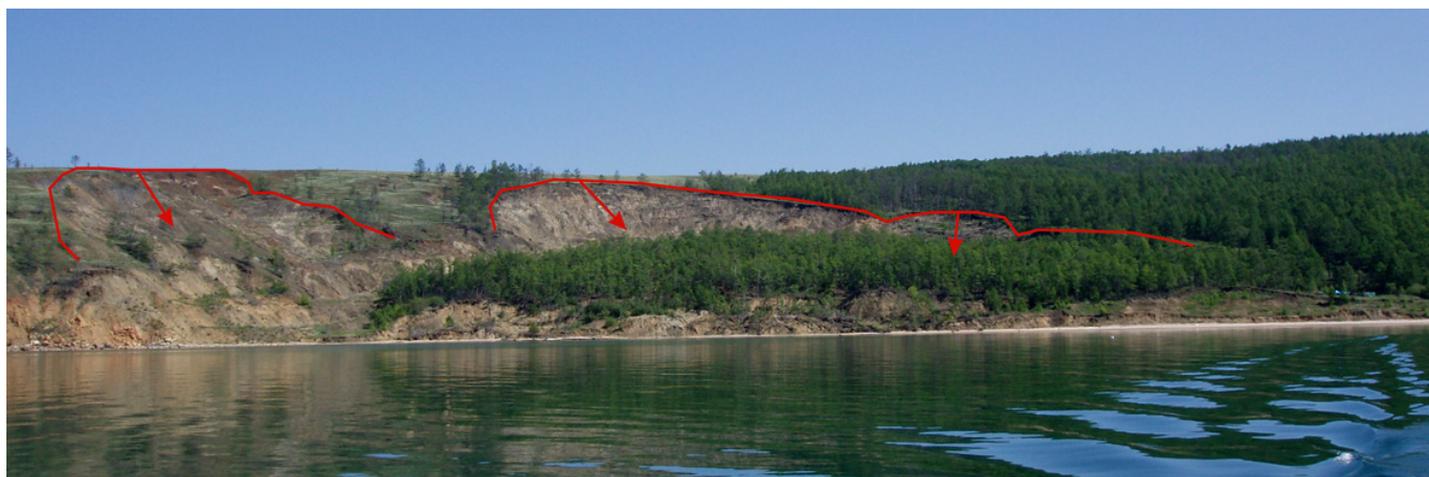


Рис. 14. Сасинский оползень с выделенными оползневыми цирками.

Fig. 14. The Sasinsky landslide with landslide cirques.

вития неогеновых толщ оползни проявлены в местечке Саса, заливах Баян-Шунген, Сарайском и др. (рис. 14). Техногенные колебания уровня озера по величине не велики, но нагонные сейши немало способствуют разрушению берегов.

Селевые потоки часто образуются на юго-восточном и северо-западном побережьях в результате интенсивного физического выветривания, накопления больших объемов грубообломочного материала и выпадения ливневых осадков.

Интенсивные экзогенные процессы происходят и в акватории озера. Так, в юго-восточной части подводного склона, по данным непрерывного сейсмопрофиллирования, фиксируются большие оползни (рис. 15).

При подводном сползании осадочных образований и турбидитных потоках, вызванных землетрясениями, иногда наблюдаются выбросы метана (рис. 16) [Vologina et al., 2012].

Таким образом, экзогенная переработка берегов оз. Байкал идет при участии тектонических землетря-

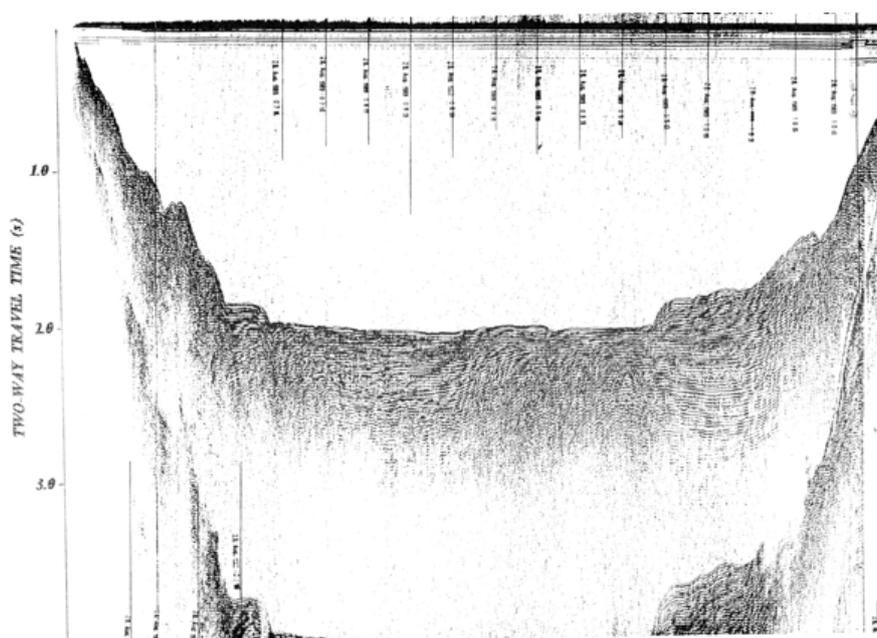


Рис. 15. Профиль НСП-17. Южная котловина оз. Байкал.

Fig. 15. Profile CSP-17. The southern basin of Lake Basin.

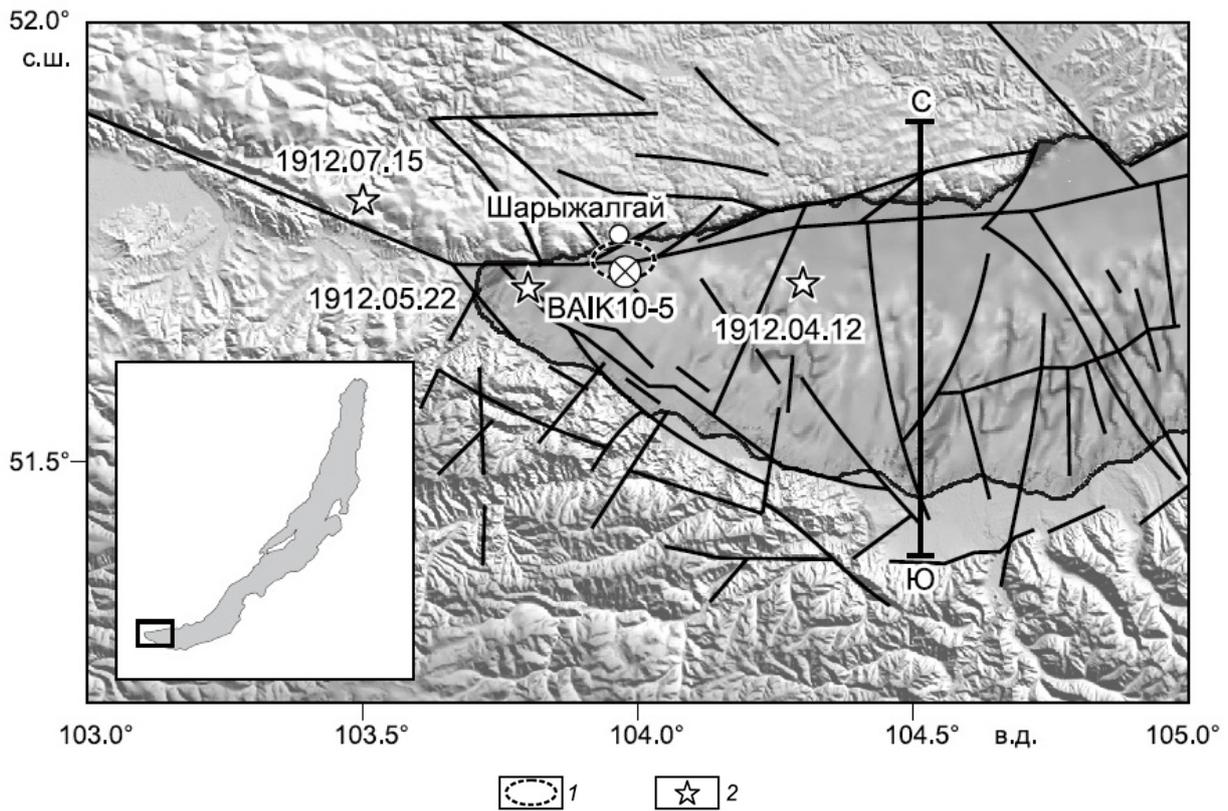


Рис. 16. Южный Байкал. 1 – район схода турбидитных потоков и выбросов метана; 2 – эпицентры тектонических землетрясений, сплошные черные линии – активные разломы [Vologina et al., 2012].

Fig. 16. South Baikal. 1 – area of occurrence of turbidite flows and methane outbursts, 2 – epicentres of tectonic earthquakes; solid black lines – active faults [Vologina et al., 2012].

сений и, возможно, наведенной сейсмичности [Galazy, Loot, 2000]. Сейсмические события на Байкале происходят периодически (табл. 4) [Levi et al., 2003; Zadonina, 2007].

Иркутское водохранилище. В результате строительства Иркутской ГЭС и заполнения водохранилища произошло изменение режима рек бассейна р. Ангары и водного баланса на прилегающих территориях. Главной задачей плотины Иркутской ГЭС являлось регулирование стока р. Ангары, что должно было способствовать нормальной работе гидросооружений Ангарского каскада. Из-за особенностей ледостава на сибирских реках, резко континентального климата и не-

равномерного выпадения атмосферных осадков были частыми весенние, летние и зимние наводнения, которые прекратились на реке после строительства Иркутской ГЭС. Однако эксплуатация водохранилища привела к возникновению ряда не свойственных реке процессов – абразийных и оползневых [Kadetova et al., 2008] (рис. 17).

Братское водохранилище. Его особенностью является то, что по характеру стока эта природно-техническая система многолетнего регулирования допускает величину понижения уровня до 10 м с ежегодными колебаниями 2–3 м. Изменение уровня и максимальные сработки обусловлены как природными, так и

Таблица 4. Результаты спектрального анализа временных рядов, числа сообщений о землетрясениях (мировая хронология)
Table 4. Results of spectral analysis of time series and numbers of reported earthquakes (world history)

Интервал, годы	Период, годы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1501–2002			19–25		42		126	170	
1501–1902	5		18–25			50		130–135	200
1902–2002	5–6	9–13	25–26	34		50			



Рис. 17. Проявление абразионного процесса на берегах Иркутского водохранилища (микрорайон Солнечный, фото 2011 г.).

Fig. 17. Manifestation of abrasion at the banks of the Irkutsk reservoir (Solnechny District of the city of Irkutsk, photo taken in 2011).

A



B



C



Рис. 18. Крупный техногенный оползень. А – панорамный вид Балаганского оползня, возникшего в 1993 г.; В – трещиноватость горных пород зоны выветривания; С – абразионный уступ.

Fig. 18. A large technogenic landslide. A – panoramic view of the Balagansky landslide formed in 1993; B – fracturing of rocks in the weathering zone; C – abrasion bench.

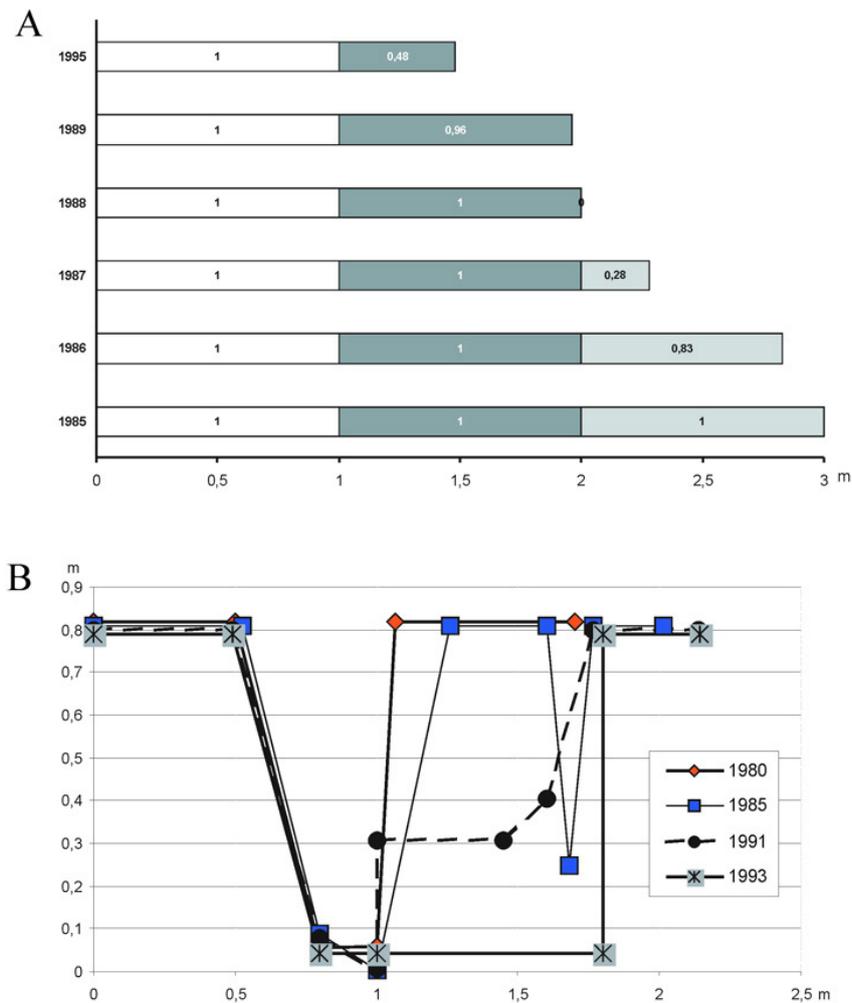


Рис. 19. Динамика Имбейского участка. *A* – отступление бровки берегового уступа за десять лет; *B* – характер изменения оползневого рельефа по одной из марок.

Fig. 19. Dynamics of the Imbeysky site. *A* – retreat of the bank's edge for ten years; *B* – variation of the landslide relief at one of the check points.

техногенными факторами. За 45-летний период эксплуатации наблюдалось несколько циклов понижения и последующего повышения уровня в многолетнем ходе (см. рис. 13). Однако время от времени производились эксплуатационные сбросы воды, наибольший из которых имел место быть в феврале 1990 г., когда уровень был быстро снижен на 6 м. В 2001 г. было осуществлено быстрое поднятие уровня воды на 5.56 м. Эта крупная и высокодинамичная природно-техническая система оказывает существенное влияние на формирование береговой линии и проявление экзогенных геологических процессов на прилегающих территориях [Trzhtsin'sky et al., 2005]. Происходит интенсивная переработка склонов в результате кооперативного воздействия экзогенных (выветривание, абразия, оползни и др.) и эндогенных процессов (рис. 18).

В северной части, где в основном отмечаются техногенные сейсмические события, расположен ряд оползневых участков, входящих в мониторинговую

сеть Института земной коры СО РАН. Проанализировав динамику оползневых участков с учетом вклада техногенной сейсмичности в развитие береговых склонов [Trzhtsin'sky et al., 2007], видим, что эти сотрясения сказались на темпах развития гравитационных деформаций и отступления кромки берега (см. рис. 10). Например, Имбейский оползневой участок, расположенный на правом берегу Окинской акватории, активизировался как отклик на техногенные сейсмические события района. Оползень заложился в песчаниково-глинистых породах ийской свиты нижнего ордовика, на крутом склоне высотой 90 м. Оползневой склон расположен на узком участке Окинской акватории, и волны к нему подходят по касательной, что значительно снижает их разрушающую способность. По материалам многолетних наблюдений роль абразивной деятельности как фактора, влияющего на динамику смещений грунтовых масс на склоне, на данном участке не установлена. Однако анализ графиков отступа-

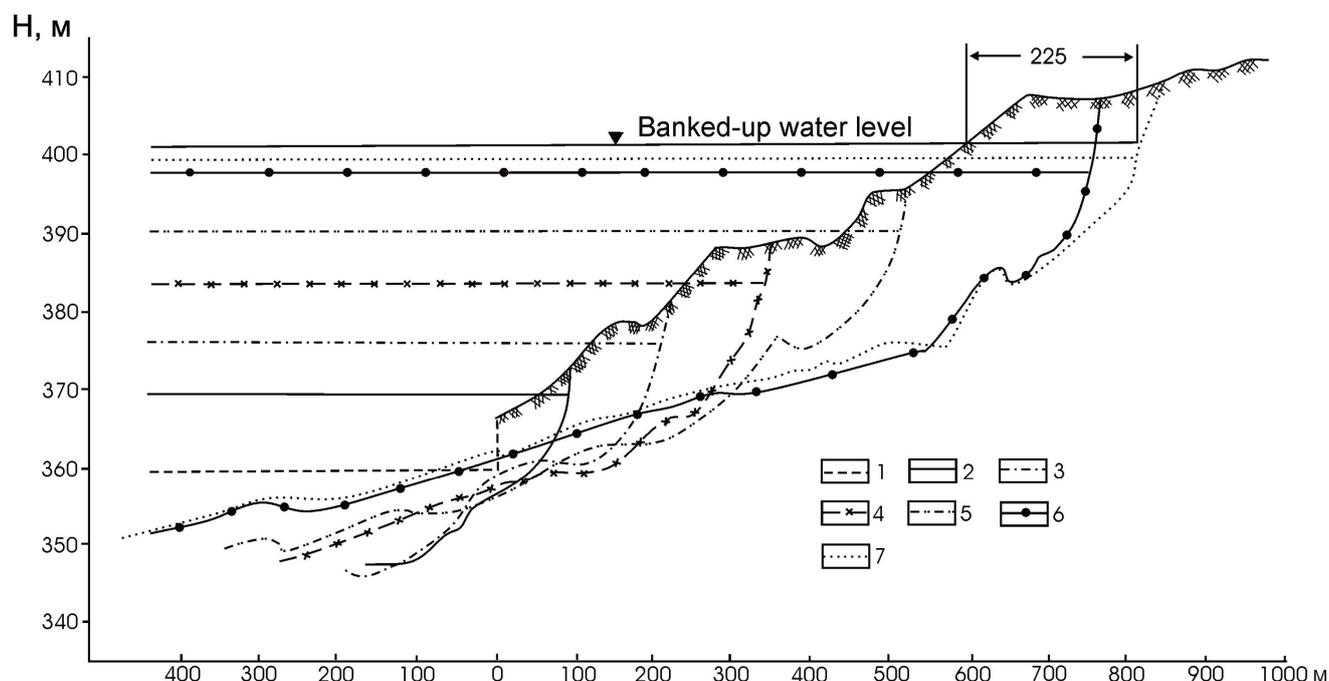


Рис. 20. Развитие берега у пос. Артумей, сложенного песчаными породами в период заполнения Братского водохранилища [Lashchilova, 1972]. Уровни водохранилища: 1 – 1962 г., 2 – 1963 г., 3 – 1964 г., 4 – 1965 г., 5 – 1966 г., 6 – 1967 г., 7 – 1968 г.

Fig. 20. Development of the bank near Artumey settlement. The bank was composed of sandy rocks during infilling of the Bratsk reservoir [Lashchilova, 1972]. Reservoir levels: 1 – 1962; 2 – 1963; 3 – 1964; 4 – 1965; 5 – 1966; 6 – 1967; 7 – 1968.

ния береговой бровки показал, что процесс ее разрушения происходит неравномерно. Так, в период 1985–1988 гг., т.е. в то время, когда техногенные сейсмические события здесь происходили регулярно (в летне-осенние периоды произошло шесть событий с энергетическим классом $K=8.0-8.3$), зафиксированы вывалы крупных блоков породы, что привело к значительному отступанию береговой бровки (например, 1986–1987 г. на 0.55 м) (рис. 19, А). Анализ скоростей смещения тела самого оползня также демонстрирует отзывчивость среды на техногенные сейсмические сотрясения. В 1983 г. на описываемой территории отмечено три таких события, при которых Имбейский оползневой участок попал в радиус действия сейсмических волн. Динамика смещений оползневых блоков в сторону долины в эти годы составила 6 см/год. В периоды отсутствия сейсмических событий средние значения смещений за год не превышали 1.2 см (рис. 19, В).

Возможно, что и формирование Стрелкинского оползня, обнаруженного осенью 1983 г., спровоцировано тремя землетрясениями, произошедшими в 1983 г. (№ 14, 15, 16 на рис. 10).

Два уникальных оползневых участка расположены по Окинской акватории – Артумей и Омский. Участок Артумей вошел в литературу как классический вариант переработки берега в первый период заполнения водоема. Наиболее катастрофические явления происходили в 1961–1967 гг. на участке берега непосредственно в р-не поселка Артумей, где в течение двух лет

берег отступил на 1.1 км. Это, в свою очередь, обусловило необходимость перенесения населенного пункта на новое место. Повышение уровня грунтовых вод способствовало обводнению нижних горизонтов песчаной толщи и нарушению устойчивости склона (рис. 20).

Поднятие уровня на 60 м в 1962 г. активизировало процесс отступления бровки вглубь на 4 м (август) и 12 м (сентябрь) [Lashchilova, 1972], в октябре 1962 г. – еще на 28 м. За зимний период 1962–1963 гг. уровень был поднят на 15 м. В данный период сказалось взвешивающее действие воды на массив [Emel'yanova, 1972], которое способствовало формированию здесь пласта лжепльвуна, обусловившего в дальнейшем развитие склона по оползневому сценарию. По данным С.И. Голенецкого в это же время на данной территории произошла серия сейсмических событий (вероятно, техногенных) интенсивностью до 2 баллов (рис. 21, 22).

Кратковременные, но сильные штормы в весенний период (май–июнь) способствовали активизации оползне-пльвуновых процессов. В мае 1963 г. отступление составило 32 м, в июне – 48 м, в октябре – 160 м. В 1964 и 1965 г. закономерность развития склона в основной своей части повторяет предыдущий период. Максимальная величина деформаций достигла в октябре 1964 г. 123 м [Lashchilova, 1972]. Наибольшие деформации произошли в 1966 г., когда уровень воды достиг эксплуатационных отметок. Такая же ситуация

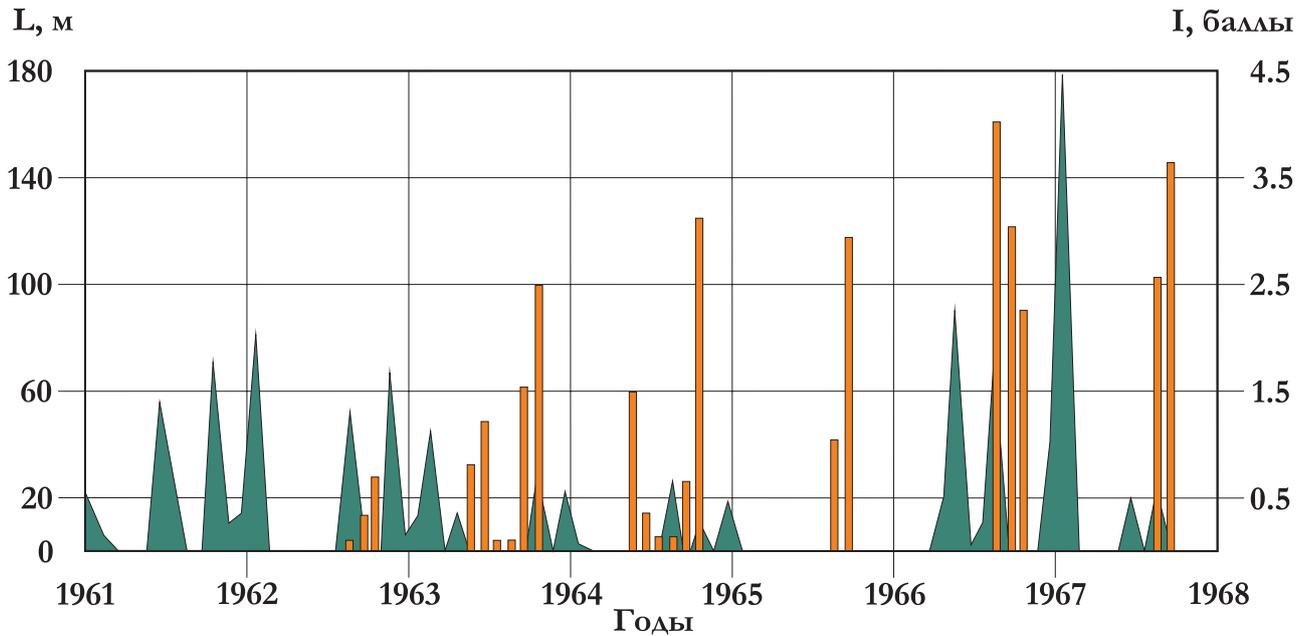


Рис. 21. Взаимосвязь отступления берега и интенсивности техногенных сейсмических событий в баллах на участке Артумей [Ovchinnikov, 2003] – землетрясения 1961–1968 гг. приводятся со ссылкой на С.И. Голенецкого. L – ширина отступления берега, м (гистограмма, оранжевые столбики); I – интенсивность колебаний грунта, баллы (кривая, темно-зеленая заливка).

Fig. 21. The relationship between retreat of the bank and intensity of technogenic seismic events at the Artumey site [Ovchinnikov, 2003]. Data on earthquakes from 1961 to 1968 are given according to S.I. Golenetsky. L – width of retreat of the bank, m (histogram, orange bars); I – intensity of ground motions, points (curve, dark green shading).

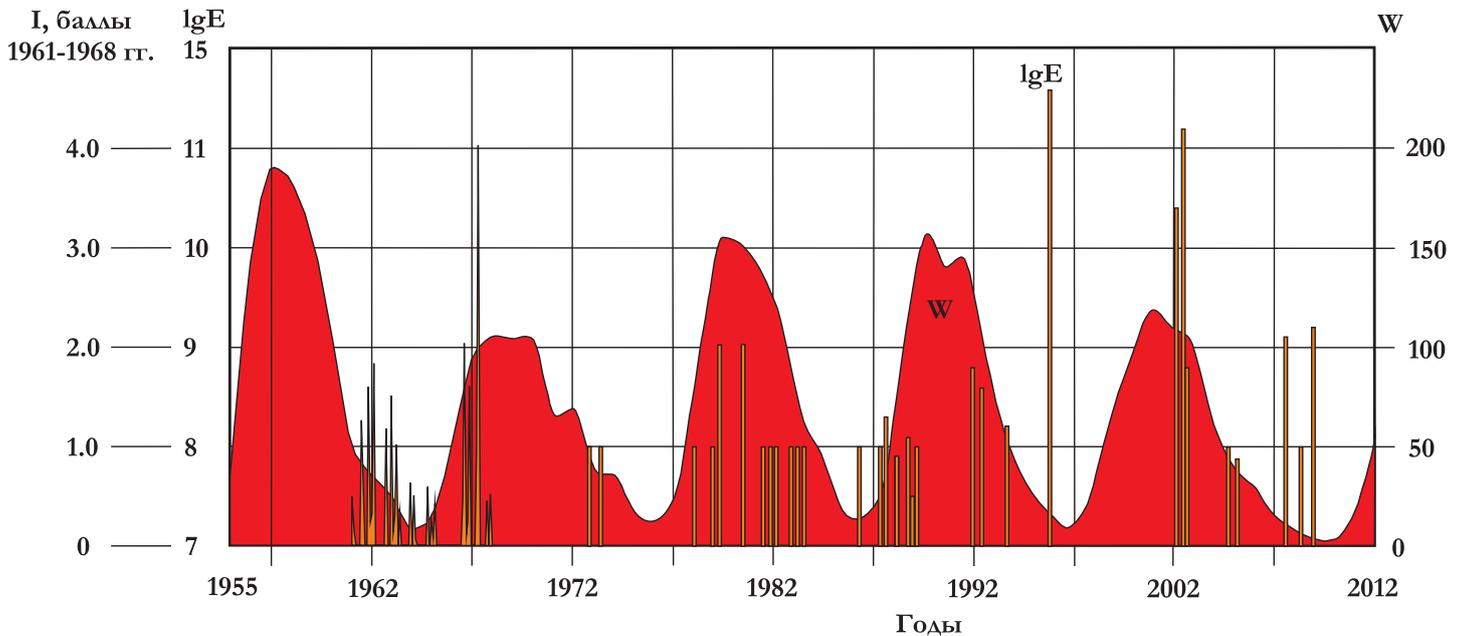


Рис. 22. Проявление наведенной и техногенной сейсмичности на Братском водохранилище с учетом данных из [Ovchinnikov, 2003]. Землетрясения 1961–1968 гг. приводятся со ссылкой на С.И. Голенецкого с добавлениями. W – числа Вольфа.

Fig. 22. Manifestation of induced and technogenic seismicity at the Bratsk reservoir, with account of data published in [Ovchinnikov, 2003]. Data on earthquakes from 1961 to 1968 according to S.I. Golenetsky are supplemented herein. W – Wolf numbers.

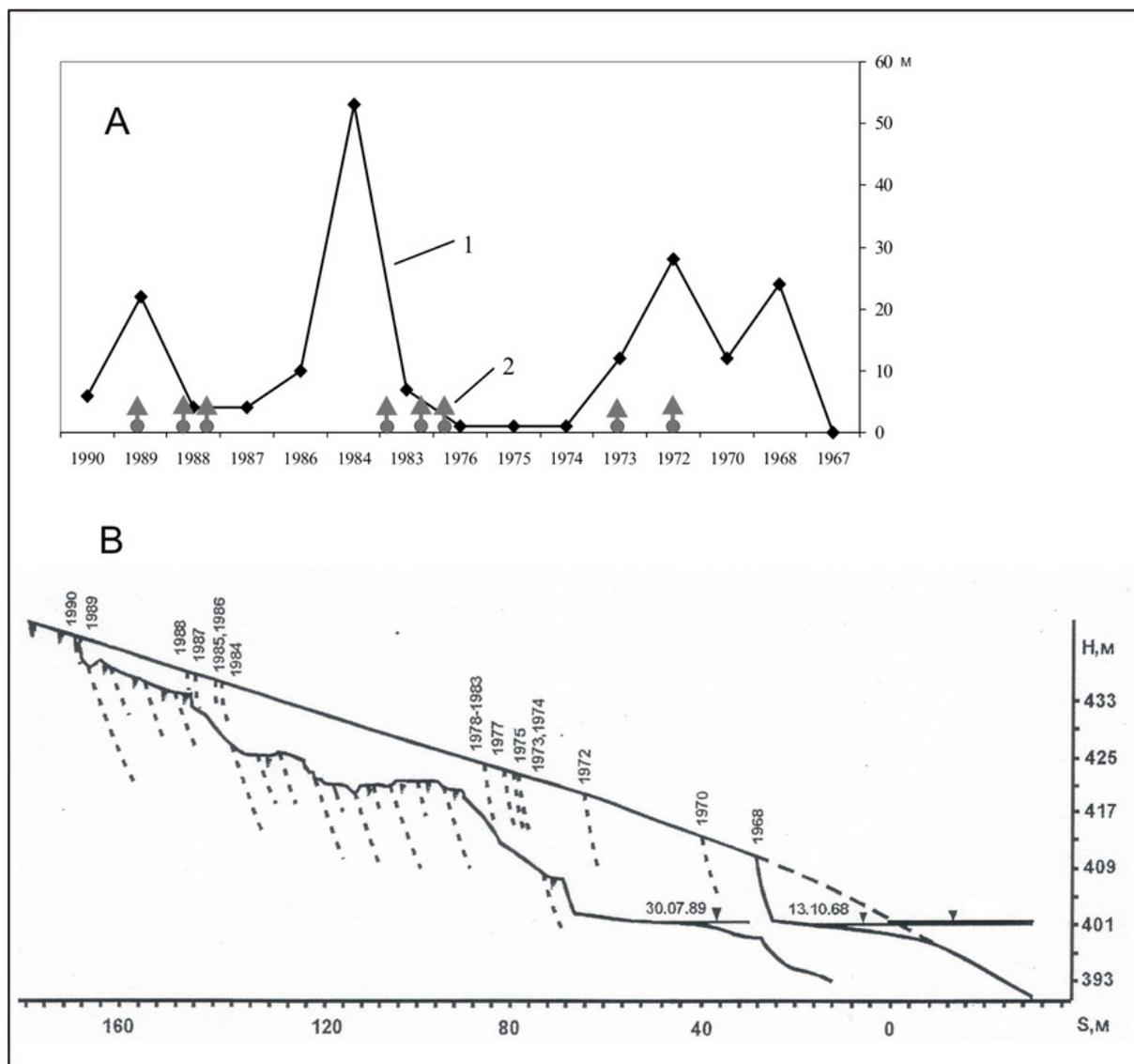


Рис. 23. Динамика Омского оползневого участка. А – всплески оползневых смещений (1) и сейсмические события (2); В – развитие берега по годам.

Fig. 23. Dynamics of the Omsky landslide site. A – bursts of landslide displacements (1) and seismic events (2); B – development of the bank over years.

сложилась и в 1967 г., когда уровень достиг НПГ. Зимний период характеризовался повышенной сейсмичностью (до 4 баллов), и в сочетании с повышением уровня водоема возникли значительные напряжения в массиве, началось активное выплывание в водоем обводненных песков, формирование крупных оползневых ступеней и их смещение под урез (в августе – 100 м, в сентябре – 144 м). Последнее смещение было отмечено в осенний период 1968 г., оно составило 50 м. Как правило, основные события происходили в летние месяцы. Максимальные объемы смещающегося песка за один год с 1 км берега составляли 3–8 тыс. м³, в 1967 г. в процесс обрушения по всему участку, протяженностью 2.5 км, было вовлечено более 8 млн м³ грунта [Lashchilova, 1972].

Следует еще раз подчеркнуть, что совместное воздействие сейсмических сотрясений и волнений в Калтукском расширении вызвало огромную нагрузку на береговые склоны. Это отразилось на устойчивости склона и привело к вытеканию массы песка из его подводной части и, как результат, к деформации и подвижке грунта в виде оползневых смещений [Potapov et al., 1997; Pavlenov, Chernykh, 2004; Ovchinnikov, 2003]. В настоящее время участок стабилен, сформировалась абразионно-аккумулятивная отмель с углом 5–8° и циркуобразная форма побережья, что способствует гашению волновой энергии на подступах к берегу. Идут небольшие размывы осушенной отмели и подножья береговых уступов.

Другой подобный сложный участок – Омский, ко-

торый развивается в терригенных породах мамырской свиты ордовика. Деформации стали интенсивно проявляться после наполнения водохранилища. Способность грунтов, слагающих этот участок, к деформациям в виде «выплывания» песчаных масс обусловлена особенностью их физико-механического состава. Согласно материалам Н.И. Демьянович, в составе алевролитов преобладает пылеватая и песчаная фракции и при водонасыщении породы ведут себя как пылеватые пески [Dem'yanovich, 1976]. Близость эпицентра сейсмического события № 16, произошедшего в августе 1983 г. в 7 км от оползня, проявилась в виде отступления бровки берегового уступа на 53 м, зафиксированного мониторинговыми наблюдениями на участке в 1984 г. (рис. 23). Все пики оползневой активности на графиках подтверждены сейсмическими событиями, хотя на данном участке нельзя недооценивать и абразионную нагрузку. Совместное влияние сотрясений и штормов в осенний период привело к значительным потерям берега.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные выше примеры не дают основания для отрицания возможности проявления наведенной сейсмичности в окрестностях крупных водохранилищ и гидротехнических сооружений. Более того, наблюдения, пусть не многочисленные, позволяют констатировать, что появление наведенной сейсмичности возможно при высоте плотины 100 м и более и объеме водной массы более 1 км³. Плотины Ангарского каскада отвечают этим параметрам. Очевидно, что создание водохранилищ изменило общую сейсмическую обстановку

в их окрестностях, а пример плотины Койна ставит нас перед необходимостью пристального внимания к плотинам сибирских гидротехнических сооружений во избежание негативных последствий. Для этого необходимо, в первую очередь, регламентировать мощность производимых взрывов для обеспечения устойчивой работы сооружений с одной стороны и для упрощения подготовки каталогов наведенных землетрясений – с другой.

Наиболее вероятный путь к решению проблемы безопасности и устойчивой работы гидротехнических сооружений при проявлении наведенной сейсмичности – организация мониторинга развития неблагоприятных процессов на водохранилищах Ангарского каскада. Он должен включать в себя:

- инженерно-геологический мониторинг береговых зон водохранилищ и оползневых процессов;
- мониторинг изменения грунтовых условий в береговых зонах водохранилищ при ритмичном подъеме-снижении уровня воды в водохранилищах;
- мониторинг мерзлотных процессов в акваториях и береговых зонах водохранилищ;
- геодезический мониторинг береговых зон водохранилищ;
- GPS-геодезический мониторинг деформаций земной поверхности и лазерную дальнометрию;
- сейсмический мониторинг наведенной сейсмичности и промышленных взрывов;
- сейсмоакустический мониторинг акваторий водохранилищ на предмет их заиливания.

Перечисленные виды мониторинга позволят разработать реальные методы инженерной защиты гидроэнергетических сооружений.

6. ЛИТЕРАТУРА

- Afanasiev A.N., 1976. Water Resources and Water Balance of Lake Basin. Nauka, Novosibirsk, 238 p. (in Russian) [Афанасьев А.Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск: Наука, 1976. 238 с.].
- Baecher G.B., Keeney R.L., 1982. Statistical examination of reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America* 72 (2), 553–569.
- Chizhevsky A.L., 1976. The Echo of Solar Storms at the Earth. Mysl, Moscow, 367 p. (in Russian) [Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 367 с.].
- Dem'yanovich N.I., 1976. Prediction of landslides at Angara reservoirs. Nauka, Novosibirsk, 86 p. (in Russian) [Демьянович Н.И. Прогноз оползней на ангарских водохранилищах. Новосибирск: Наука, 1976. 86 с.].
- Dobretsov N.L., Psakh'e S.G., Ruzhich V.V., Popov V.L., Shil'ko E.V., Granin N.G., Timofeev V.Yu., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Starchevich Ya., 2007. Ice cover of Lake Baikal as a model for studying tectonic processes in the Earth's crust. *Doklady Earth Sciences* 413 (2), 155–159. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X07020018>.
- Dobretsov N.L., Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Shil'ko E.V., Levina E.A., Ponomareva E.I., 2011. On development of earthquake prediction methods by means of physical modeling in the ice cover of Lake Baikal. *Fizicheskaya Mezhmechanika* 14 (4), p. 69–80 (in Russian) [Добрецов Н.Л., Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Шилько Е.В., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О совершенствовании способов прогноза землетрясений средствами физического моделирования в ледовом покрове Байкала // *Физическая мезомеханика*. 2011. Т. 14. № 4. С. 69–80].
- Durá-Gómez I., Talwani P., 2010. Reservoir-induced seismicity associated with the Itoiz Reservoir, Spain: a case study. *Geophysical Journal International* 181 (1), 343–356. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04462.x>.
- Dyad'kov P.G., 2003. Specific features of manifestation of induced seismicity at Lake Baikal: dependence on loading rates

- and regional activations of seismogeodynamic process. *Fizicheskaya Mezomechanika* 6 (1), 55–61 (in Russian) [Дядьков П.Г. Особенности проявления вызванной сейсмичности на оз. Байкал: зависимость от скорости нагружения и региональных активизаций сейсмогеодинамического процесса // *Физическая мезомеханика*. 2003. Т. 6. № 1. С. 55–61].
- Emel'yanova E.P., 1972. Basic Regularities of Landslides. Nedra, Moscow, 297 p. (in Russian) [Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 297 с.].
- Ferreira J.M., De Oliveira R.T., Assumpção M., Moreira J.A.M., Pearce R.G., Takeya M.K., 1995. Correlation of seismicity and water level in the Açú reservoir – an example from Northeast Brazil. *Bulletin of the Seismological Society of America* 85 (5), 1483–1489.
- Ferreira J.M., França G.S., Vilar C.S., do Nascimento A.F., Bezerra F.H.R., Assumpção M., 2008. Induced seismicity in the Castanhão reservoir, NE Brazil – preliminary results. *Tectonophysics* 456 (1–2), 103–110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2006.11.011>.
- Galazy G.I., Loot B.F., 2000. Baikal earthquakes (one of possible causes). *Geografiya i Prirodnye Resursy* 2, 37–42 (in Russian) [Галазий Г.И., Лут Б.Ф. Байкальские землетрясения (одна из возможных причин) // *География и природные ресурсы*. 2000. № 2. С. 37–42].
- Golenetskii S.I., 1997a. Earthquakes in Irkutsk. Imya, Irkutsk, 95 p. (in Russian) [Голенецкий С.И. Землетрясения в Иркутске. Иркутск: Имя, 1997. 95 с.].
- Golenetskii S.I., 1997b. Problem of the induced seismicity in the area of the Irkutsk water reservoir at the southwestern ending of lake Baikal. *Geologiya i Geofizika* 38 (10), 1692–1698.
- Golenetskii S.I., 1998. A rare earthquake in the south of the Siberian Platform. *Doklady Earth Sciences* 363 (9), 1257–1260.
- Gupta H.K., 1985. The present status of reservoir induced seismicity investigations with special emphasis on Koyna earthquakes. *Tectonophysics* 118 (3–4), 257–279. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(85\)90125-8](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(85)90125-8).
- Gupta H.K., 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews* 58 (3–4), 279–310. [http://dx.doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00063-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00063-6).
- Gupta H., Narain H., Rastogi B.K., Mohan I., 1969. A study of the Koyna earthquake of December 10, 1967. *Bulletin of the Seismological Society of America* 59 (3), 1149–1162.
- Gupta H.K., Rastogi B.K., Chadha R.K., Mandal P., Sarma C.S.P., 1997. Enhanced reservoir-induced earthquakes in Koyna region, India, during 1993–95. *Journal of Seismology* 1 (1), 47–53. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009742428657>.
- Gupta H.K., Rastogi B.K., Narain H., 1972. Common features of the reservoir-associated seismic activities. *Bulletin of the Seismological Society of America* 62 (2), 481–492.
- Imetkhenov A.B., 2009. Conditions of engineering geology of the coast. In: Tulokhonova A.K. (Ed.), Baikal. Nature and People. EKOS Publishing House of BSC, SB RAS, Ulan-Ude, p. 230–235 (in Russian) [Иметхенов А.Б. Инженерно-геологические условия побережья // Байкал. Природа и люди / Под ред. А.К. Тулохонова. Улан-Удэ: ЭКОС, Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. С. 230–235].
- Kadetova B.V., Rybchenko A.A., Trzhtsin'skiy Y.B., 2008. The present geocological situation within the territory of the city of Irkutsk. *Geography and Natural Resources* 29 (1), 43–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gnr.2008.04.008>.
- Kangi A., Heidari N., 2008. Reservoir-induced seismicity in Karun III dam (Southwestern Iran). *Journal of Seismology* 12 (4), 519–527. <http://dx.doi.org/10.1007/s10950-008-9104-4>.
- Kaufmann G., Amelung F., 2000. Reservoir-induced deformation and continental rheology in vicinity of Lake Mead, Nevada. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105 (B7), 16341–16358. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JB900079>.
- Keith C.M., Simpson D.W., Soboleva O.V., 1982. Induced seismicity and style of deformation at Nurek Reservoir, Tadzhik SSR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 87 (B6), 4609–4624. <http://dx.doi.org/10.1029/JB087iB06p04609>.
- Kulkarni M.N., Radhakrishnan N., Rai D., 2006. Global positioning system in disaster monitoring of Koyna dam, Western Maharashtra. *Survey Review* 38 (301), 629–636. <http://dx.doi.org/10.1179/003962606780732083>.
- Lashchilova V.M., 1972. Reconfiguration of the Bratsk reservoir shoreline near the Artumey settlement. *Trudy GGI* 190, 105–129 (in Russian) [Лащилова В.М. Переформирование берега Братского водохранилища у пос. Аргумей // *Труды ГГИ*. 1972. Вып. 190. С. 105–129].
- Levi K.G., Zadonina N.V., 2012. Heliogeodynamics: Natural Aspects of Global Solar Minima. ISU, Irkutsk, V. 1. Book 2, 668 p. (in Russian) [Леви К.Г., Задонина Н.В. Гелиогеодинамика: Природные аспекты глобальных солнечных минимумов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. Т. 1. Книга 2. 668 с.].
- Levi K.G., Zadonina N.V., Berdnikova N.E., 2003. Modern geodynamics and heliogeodynamics. The 500-years chronology of anomalous phenomena in nature and society in Siberia and Mongolia: Textbook for universities. Irkutsk State Technical University, Irkutsk. Book II, 384 p. (in Russian) [Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. 500-летняя хронология аномальных явлений в природе и социуме Сибири и Монголии: Учеб. пособие для вузов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. Книга II. 384 с.].
- Manake A., Kulkarni M.N., 2002. Study of the deformation of Koyna dam using the Global Positioning System. *Survey Re-*

- view 36 (285), 497–507. <http://dx.doi.org/10.1179/003962602791483118>.
- Meade R.B., 1991. Reservoirs and earthquakes. *Engineering Geology* 30 (3–4), 245–262. [http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952\(91\)90062-P](http://dx.doi.org/10.1016/0013-7952(91)90062-P).
- Osipov V.I., 1996. Megacities endangered by natural catastrophes. *Vestnik RAN* 66 (9), 771–782 (in Russian) [Осипов В.И. Мегалополисы под угрозой природных катастроф // Вестник РАН. 1996. Т. 66. № 9. С. 771–782].
- Ovchinnikov G.I., 2003. The dynamics of the shoreline zone of the Angara reservoirs. Abstract of the Ph. D. thesis. Irkutsk, 50 p. (in Russian) [Овчинников Г.И. Динамика береговой зоны ангарских водохранилищ: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Иркутск, 2003. 50 с.].
- Pavlenov V.A., Chernykh E.N., 2004. Problems of induced seismicity of the Angarsk cascade of hydropower stations. In: Modern geodynamics and hazardous natural processes in Central Asia. Irkutsk, p. 190–196 (in Russian) [Павленов В.А., Черных Е.Н. Проблемы наведенной сейсмичности Ангарского каскада ГЭС // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск, 2004. С. 190–196].
- Ping H., Yuliang H., 1992. Advances in reservoir-induced seismicity research in China. *Tectonophysics* 209 (1–4), 331–337. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90043-6](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(92)90043-6).
- Potapov V.A., Tabulevich V.N., Chernykh E.N., 1997. The impact of storm microseismic vibrations on seismicity in the area of the Kuril islands in the Pacific Ocean and at Lake Baikal. *Geologiya i Geofizika* 38 (8), 1411–1419 (in Russian) [Потапов В.А., Табулевич В.Н., Черных Е.Н. Влияние штормовых микросейсмических колебаний на сейсмичность в районе Курильских островов Тихого океана и на озере Байкал // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 8. С. 1411–1419].
- Psakhie S.G., Shilko E.V., Astafurov S.V., Dimaki A.V., Ruzhich V.V., Panchenko A.Yu., 2008. Model study of the formation and evolution of deformation-induced structures of the subduction type in the ice cover of Lake Baikal. *Physical Mesomechanics* 11 (1), 55–65.
- Ruzhich V.V., Psakhie S.G., Chernykh E.N., Borneyakov S.A., Granin N.G., 2009. Deformation and seismic effects in the ice cover of Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 50 (3), 214–221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2008.08.005>.
- Simpson D.W., Leith W.S., Scholz C.H., 1988. Two types of reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America* 78 (6), 2025–2040.
- Simpson D.W., Negmatullaev S.K., 1981. Induced seismicity at Nurek Reservoir, Tadjikistan, USSR. *Bulletin of the Seismological Society of America* 71 (5), 1561–1586.
- Talwani P., 1997. On the nature of reservoir-induced seismicity. *Pure and Applied Geophysics* 150 (3–4), 473–492. <http://dx.doi.org/10.1007/s000240050089>.
- Trzhtsinsky Yu.B., Kozyreva E.A., Radziminovich Ya.B., 2007. The effect of seismic events on sliding deformations of the Bratsk water reservoir shores. *Russian Geology and Geophysics* 48 (7), 614–615. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.002>.
- Trzhtsinsky Yu.B., Kozyreva E.A., Verkhozin I.I., 2005. Specific Features of Engineering Geology of the Irkutsk Amphitheater. Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 124 p. (in Russian) [Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Верхозин И.И. Инженерно-геологические особенности Иркутского амфитеатра. Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2005. 124 с.].
- Trzhtsinskii Yu.B., Levi K.G., 2009. Natural and human-induced processes water reservoirs at the coordinated hydroelectric system on the Angara River and the problem of induced seismicity. *Geoekologiya* 1, 71–79.
- Vologina E.G., Sturm M., Radziminovich Ya.B., Vorob'eva S.S., Shchetnikov A.A., 2012. The 1912 earthquake in South Baikal: traces in bottom sediments and gas release into the water column. *Russian Geology and Geophysics* 53 (12), 1342–1350. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2012.10.007>.
- Zadonina N.V., 2007. Dynamics of Temporal Variations of Natural Hazard Intensity. The Analysis of Time Series. Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 102 p. (in Russian) [Задонина Н.В. Динамика временных вариаций интенсивности опасных природных процессов. Анализ временных рядов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 102 с.].



Леви Кирилл Георгиевич, докт. геол.-мин. наук, профессор, зам. директора института по науке
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел. (3952)424562; e-mail: levi@crust.irk.ru

Levi, Kirill G., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Deputy Director
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel. +7(3952)424562; e-mail: levi@crust.irk.ru



Козырева Елена Александровна, канд. геол.-мин. наук, зав. лабораторией инженерной геологии и геоэкологии
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: (3952)425899; e-mail: kozireva@crust.irk.ru

Kozyreva, Elena A., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of the Laboratory of Engineering Geology and Geocology

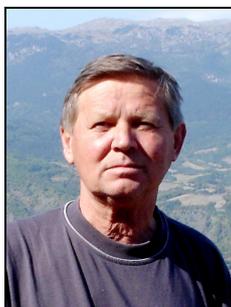
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: (3952)425899; e-mail: kozireva@crust.irk.ru



Задонина Наталья Витальевна, канд. геол.-мин. наук, доцент
Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83
Тел.: (3952)405113

Zadonina, Natalia V., Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor

National Research Irkutsk State Technical University
83 Lermontov street, Irkutsk 664074, Russia
Tel.: (3952)405113



Чечельницкий Владимир Васильевич, канд. геол.-мин. наук, заместитель директора по научной работе
Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
Тел.: (3952)427490; e-mail: chechel@crust.irk.ru

Chechelnitsky, Vladimir V., Candidate of Geology and Mineralogy, Deputy Director for Science

Baikal Division of Geophysical Survey SB RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: (3952)427490; e-mail: chechel@crust.irk.ru



Гилёва Надежда Алексеевна, главный геофизик
Байкальский филиал Геофизической службы СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128
Тел.: (3952)511231; e-mail: nagileva@crust.irk.ru

Gilyova, Nadezhda A., Chief Geophysicist

Baikal Division of Geophysical Survey SB RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: (3952)511231; e-mail: nagileva@crust.irk.ru