

**ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В ЗАЛИВЕ ПРОВАЛ (ОЗЕРО БАЙКАЛ)  
ПОСЛЕ СЕЙСМОГЕННОГО ОПУСКАНИЯ УЧАСТКА ДЕЛЬТЫ СЕЛЕНГИ**

**Е.Г. Вологина, И.А. Калугин\*, Ю.Н. Осуховская\*\*, М. Штурм\*\*\*, Н.В. Игнатова,  
Я.Б. Радзиминович, А.В. Дарьин\*, М.И. Кузьмин\*\***

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

*\*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

*\*\*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

*\*\*\*EAWAG, CH-8600 Dübendorf, Switzerland*

Приведены данные комплексного исследования современных осадков зал. Провал, образованного при катастрофическом погружении большого блока под воду в результате землетрясения 1862 г. Сопоставление схемы 1862 г. и современной карты залива показало, что за 140 лет граница дельты р. Селенга значительно сместилась на восток. Отложения зал. Провал представлены песками, алевроитопелитовыми и пелитоалевритовыми илами. Терригенный материал в них преобладает и состоит из минеральных зерен и наземных растительных остатков. Кроме того, присутствует примесь створок диатомей и спикул губок. В юго-западной части залива установлены турбидиты и почвенный слой, погребенный при подъеме уровня Байкала в 1959—1964 гг. после строительства Иркутской ГЭС. В северо-восточной части залива в колонке донных осадков обнаружен торфоподобный слой, образованный в оз. Белое, существовавшем в Цаганской степи до землетрясения 1862 г. Данные диатомового анализа свидетельствуют о том, что это было мелководное эвтрофное озеро. Скорости осадконакопления в разных местах зал. Провал резко отличаются и напрямую зависят от близости р. Селенга. Колебания геохимических индикаторов, отражающих соотношение органических и обломочных компонентов в донных отложениях зал. Провал, контролируются изменениями температуры и уровня оз. Байкал.

*Землетрясение, донные отложения, магнитная восприимчивость, диатомей, скорость современного осадконакопления, элементный состав, зал. Провал.*

**SEDIMENTATION IN PROVAL BAY (LAKE BAIKAL) AFTER EARTHQUAKE-INDUCED SUBSIDENCE  
OF PART OF THE SELENGA RIVER DELTA**

**E.G. Vologina, I.A. Kalugin, Yu.N. Osukhovskaya, M. Sturm, N.V. Ignatova,  
Ya.B. Radziminovich, A.V. Dar'in, and M.I. Kuz'min**

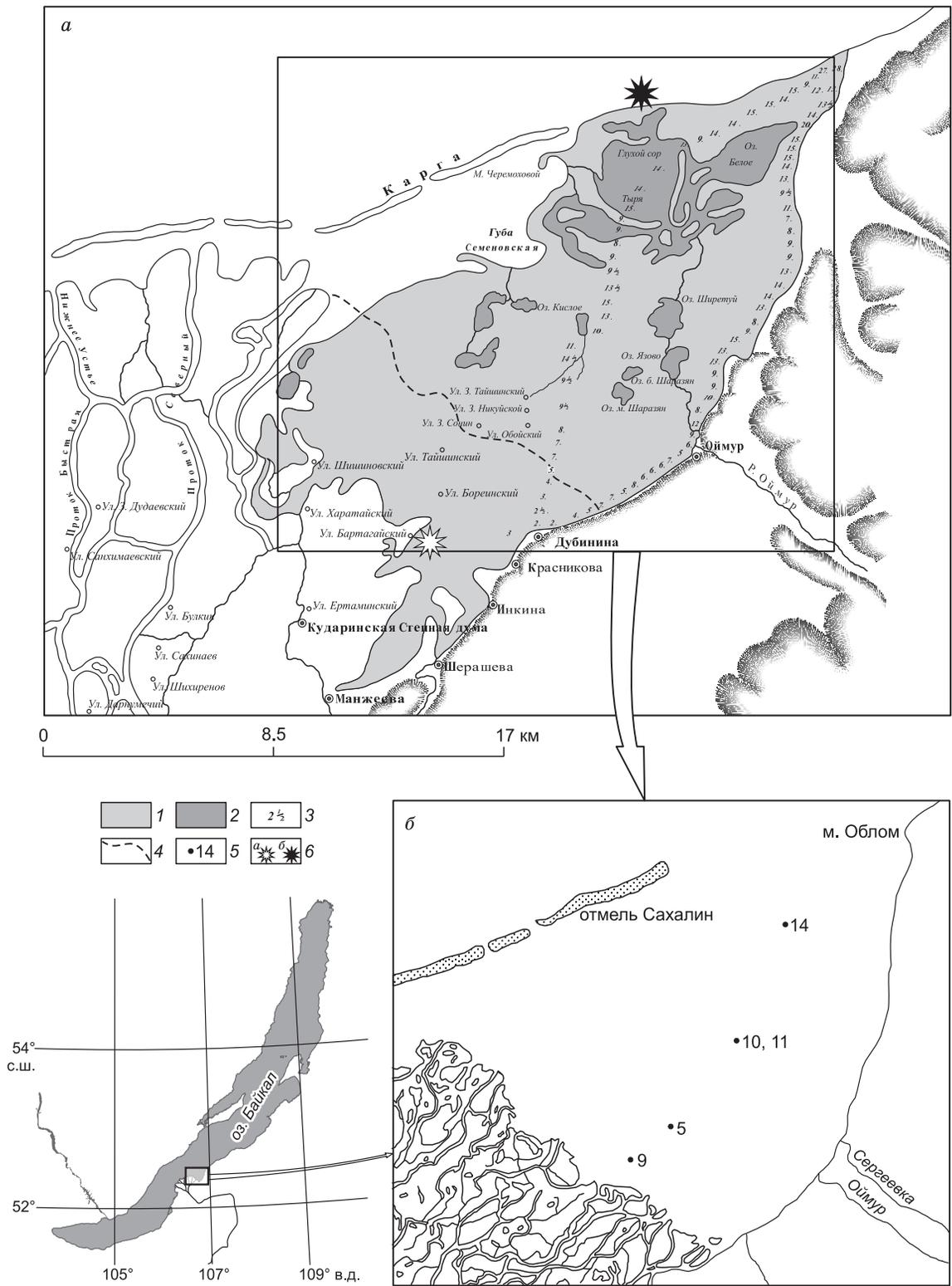
The paper presents the results of a comprehensive investigation into the recent sediments of Proval Bay. This bay formed during catastrophic flooding of a big block of land as a result of an earthquake in 1862. Comparison of the sketch map of the bay for 1862 with its modern map shows that the boundary of the Selenga River delta has shifted considerably eastward. The sediments of Proval Bay are sands, silty pelite, and pelitic silt. Terrigenous material is predominant and consists of mineral grains and land plant remains admixed with diatom frustules and sponge spicules. In the southwestern part of the bay, turbidites and a soil layer have been found. The latter was buried when the water level in Lake Baikal rose after the construction of the Irkutsk dam in 1959–1964. In the northeastern part of the bay, a peatlike layer has been found in the bottom sediment core. It formed in Lake Beloe, which existed in the Tsagan steppe before the 1862 earthquake. According to diatom analysis, this lake was shallow and eutrophic. The sedimentation rates in different parts of Proval Bay differ greatly and depend directly on proximity to the Selenga River. Variations in the geochemical indicators which reflect the ratio of organic to clastic components in the bottom sediments of the bay are controlled by temperature and water level variations in Lake Baikal.

*Earthquake, bottom sediments, magnetic susceptibility, diatoms, rate of recent sedimentation, elemental composition, Proval Bay*

**ВВЕДЕНИЕ**

Особый интерес представляют природные объекты, образованные сравнительно недавно. К ним можно отнести зал. Провал на юго-западе оз. Байкал, образовавшийся в 1862 г. в результате катастрофического землетрясения в районе дельты р. Селенга.

Цаганское землетрясение, произошедшее 12 января 1862 г. (по новому стилю) было одним из сильнейших в Восточной Сибири. Последствия этого тектонического события были детально изучены и



**Рис. 1.** Карта Цаганской степи по съемке экспедиции Русского географического общества летом 1862 г. (скопирована с оригинального издания с сохранением первоначального оформления) [Орлов, 1872] (А), расположение точек отбора кернов в зал. Провал (на современной топооснове) (Б).

1 — территория Цаганской степи, затопленная после землетрясения; 2 — озера, существовавшие в Цаганской степи до землетрясения; 3 — промеры глубин (в футах), выполненные экспедицией Русского географического общества [Орлов, 1872]; 4 — современная граница дельты р. Селенга; 5 — места отбора колонок донных отложений; 6 — местоположение эпицентра Цаганского землетрясения 12 января 1862 г., согласно [Новый каталог..., 1977] (а) и по определению С.И. Голенецкого [1996] (б).

задокументированы экспедицией Сибирского отдела Императорского Русского географического общества [Стибнев, 1864; Орлов, 1872; Мушкетов, Орлов, 1893; Сейсмическое районирование..., 1977].

По современной оценке, сделанной на основе анализа первичных материалов, значение магнитуды основного толчка составляло приблизительно 7.5 [Новый каталог..., 1977]. Координаты эпицентра, найденные в разное время, несколько различаются. Так, согласно параметрам, приведенным в [Новый каталог..., 1977], эпицентр располагался к юго-западу от современной береговой линии зал. Провал, тогда как, по оценке С.И. Голенецкого [1996], местоположение эпицентра следует сместить к северо-востоку от залива.

Землетрясение сопровождалось значительным погружением и затоплением Цаганской степи, в которой существовали малые озера. По материалам полковника А. Фитингофа [1865], между деревнями Дубинино и Оймур величина погружения оценивается в 2 сажени (~4 м). Наибольшие величины вертикального смещения приурочены к северо-восточному окончанию Цаганской степи и, согласно съемке экспедиции Русского географического общества, составляли около 28 футов (~9 м) [Орлов, 1872]. Общая площадь опустившегося участка оценивается в 200 км<sup>2</sup>. Схема Цаганской степи с указанием затопленной местности по результатам съемки экспедиции Русского географического общества летом 1862 г. приведена на рис. 1, А.

В образовавшемся заливе после землетрясения накопились донные отложения мощностью до 3.6 м [Ладохин, 1960]. Почвы Цаганской степи являются маркирующим горизонтом, определяющим нижнюю границу этих осадков. Исследованию донных отложений залива посвящен ряд работ [Ладохин, 1960; Казенкина, Ладохин, 1961; Тулохонов и др., 2006]. Однако использованное оборудование не позволяло получать ненарушенные колонки осадков, в результате чего верхний слой разреза был утрачен. В связи с этим данные изучения осадков зал. Провал требуют существенного дополнения и детализации. В настоящее время появилась техническая возможность отобрать и детально изучить ненарушенные колонки отложений. В наши задачи входило исследование пространственного распределения и состава поверхностных (до 1 м) осадков зал. Провал, проведение высокоразрешающих климатических реконструкций за время с 1862 г. Предварительные результаты были опубликованы в работе [Вологина и др., 2007а].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В марте 2005 г. в зал. Провал отобраны пять колонок верхней части отложений (интервал от дна залива 0—1 м) по профилю длиной около 15 км в направлении с юго-запада на северо-восток (см. рис. 1, Б). Глубина залива в точках опробования составляет 1.5—4.0 м. Для отбора ненарушенных кернов была использована грунтовая трубка UWITEC-CORER.

Место отбора колонки № 14 (здесь и далее по тексту используется полевая нумерация кернов) совпадает с бывшим местоположением оз. Белое на схеме 1862 г. и удалено от Селенги (см. рис. 1). Это обстоятельство, а также состав вскрытых осадков (в частности, наличие торфоподобного слоя) определили выбор этого разреза в качестве опорного, на котором были сосредоточены детальные комплексные исследования.

Полученные колонки были разрезаны по длине, сфотографированы, выполнено их литологическое описание, сопровождаемое просмотром сфер-слайдов. Описание последних проводилось на световом микроскопе марки SK14 (увеличение  $\times 100$ ) и включало определение основных родов ископаемых диатомовых водорослей, качественного гранулометрического состава терригенной составляющей осадков. Измерена магнитная восприимчивость отложений контактным методом с шагом 1 см с помощью индукционного каппа-метра, сконструированного в Институте геологии и геофизики СО АН СССР [Аксенов, Лапин, 1967]. Содержание биогенного кремнезема в осадках (керны № 9, 10, 14) определяли в Институте геохимии СО РАН по методике, описанной в [Mortlock, Froelich, 1989]. В колонке № 14 проанализирован общий органический углерод ( $C_{орг.}$ ) на CNS-газохроматографе ElementalAnalyzer HEKAtech Euro-AE в Швейцарском федеральном институте науки и технологии окружающей среды, а также выполнено датирование осадков колонки № 14 по  $^{210}Pb$  (период полураспада 22 года). Данный метод позволяет определять возраст геологических объектов, образовавшихся за последние 100 лет. Пробы были отобраны с интервалом 1 см и высушены посредством вымораживания. Гамма излучение  $^{210}Pb$  (46.5 кэВ) измерено откалиброванным Ge (Li) детектором. Содержание свободного  $^{210}Pb$  вычислено посредством вычитания фоновой радиоактивности от общего  $^{210}Pb$  [Von Gunten et al., 1987].

В Институте земной коры СО РАН проведен диатомовый анализ пяти проб (кern № 14). Подготовка образцов проводилась по стандартной методике для континентальных отложений [Давыдова, Стрельникова, 1979].

В колонке № 14 с шагом 5 мм определены химические элементы методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА-СИ) в Сибирском центре синхротронного излучения [Гольдберг и др., 2001; Дарьин и др., 2003; Daryin et al., 2005]. Количественное определение проводилось методом внешнего стандарта

с использованием стандартных образцов состава по аттестованной «Методике выполнения измерений при определении элементного состава образцов горных пород методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения» (свидетельство № 3-06 ФГУП СНИИМ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Литологическая характеристика осадков.** Осадки слоистые, представлены песками, алевритопелитовыми и пелитоалевритовыми илами (рис. 2). Терригенный материал в них преобладает и состоит из кластогенных минеральных зерен и наземных растительных остатков (обломков древесины, веточек растений). Кроме того, присутствует примесь створок диатомей и спикул губок. Окисленная верхняя часть разрезов имеет темно-коричневый цвет и мощность от 1.5 до 4 см. Окраска восстановленных осадков оливково-черная и коричневатая-черная.

Колонка № 14, место отбора которой, как отмечено выше, находится над бывшим оз. Белое (см. рис. 1), имеет длину 97 см. В разрезе четко выделяются три различных по составу интервала. Нижний (54.5—97 см) представлен преимущественно мелким песком, выше него залегает торфоподобный слой (34—54.5 см), состоящий в основном из растительных остатков, который, в свою очередь, перекрыт алевритовым песком с примесью пелита (0—34 см), включающим прослой, обогащенные растительными остатками (см. рис. 2).

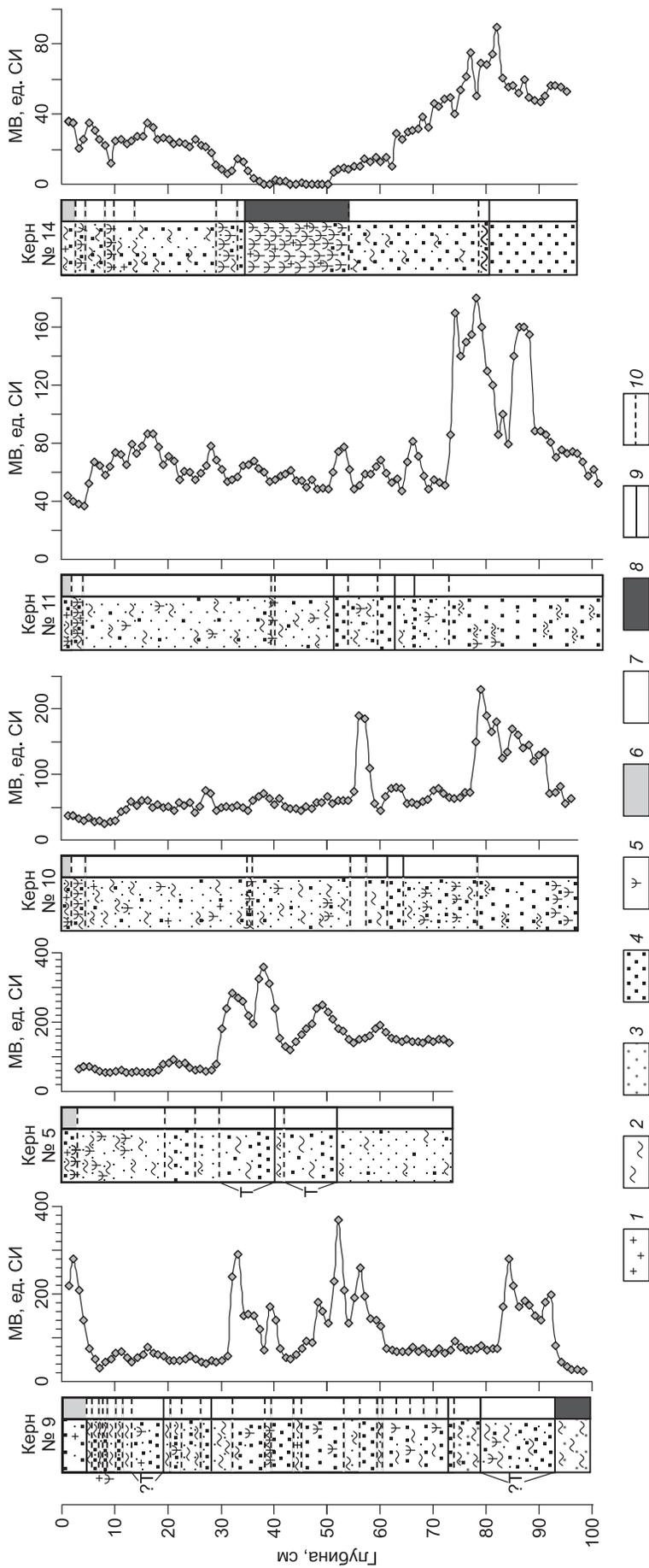
В юго-западной части профиля колонкой № 9 под переслаивающимися пелитоалевритовыми илами и песками вскрыт плотный черный почвоподобный слой (см. рис. 2). В южной части залива мощность отложений, накопившихся после землетрясения 1862 г., достигает 3.6 м [Ладохин, 1960]. Почвоподобный слой в колонке № 9 расположен на отметке 93 см от дна, и можно предположить, что захоронение его произошло значительно позже и, вероятно, связано с подъемом уровня Байкала в 1959—1964 гг. после строительства Иркутской ГЭС [Пинегин и др., 1976]. В этот промежуток времени произошло затопление и подтопление пониженных прибрежных и дельтовых речных зон побережья Байкала, при этом наибольшие площади были затоплены в дельте Селенги — более 350 км<sup>2</sup> [Пинегин и др., 1976]. В колонках № 5, 9, отобранных в непосредственной близости от дельты Селенги установлены маломощные (6—17 см) турбидитовые прослой (см. рис. 2), для них характерна градационная текстура — в основании залегает более крупнозернистый осадок (главным образом крупный песок), который сменяется тонкозернистым вверх по слою. Колонки № 10, 11 отобраны в непосредственной близости и имеют сходное строение (см. рис. 2).

**Магнитная восприимчивость (МВ) отложений** изменяется как по профилю с северо-востока на юго-запад, так и в пределах отдельных колонок. Минимальные значения ( $0—20 \cdot 10^{-6}$  ед. СИ) отмечены в черных слоях, богатых органикой (см. рис. 2). Для пелитоалевритовых и алевритопелитовых илов эта величина колеблется в пределах  $20—80 \cdot 10^{-6}$  ед. СИ. Максимальная МВ характерна для песчаных и турбидитовых слоев, что связано с повышенным содержанием в них минералов тяжелой фракции [Вологина и др., 2007б]. При этом она возрастает от северо-восточной части профиля (25—90·10<sup>-6</sup> ед. СИ — в песках колонки № 14) к центру (80—230·10<sup>-6</sup> ед. СИ, колонка № 10) и достигает максимальных значений ( $370 \cdot 10^{-6}$  ед. СИ) на юго-западе (в песках колонки № 9) (см. рис. 2), куда поступает наиболее грубый материал, благодаря близости источника осадочного материала — р. Селенга. В колонке № 14 МВ имеет повышенные значения в интервале 54.5—97 см (преимущественно мелкий песок) по сравнению с интервалом 0—34 см от поверхности осадка (алевритовый песок с примесью пелита). В торфоподобном слое (34—54.5 см) МВ близка к нулю (см. рис. 2).

**Содержания биогенного кремнезема**, источником которого служат главным образом скелеты диатомовых водорослей, в исследованных осадках зал. Провал невелики и составляют 0.3—2.7 % (рис. 3), что связано с интенсивным поступлением терригенного материала с водами р. Селенга [Выхристюк, 1979]. Лишь в торфоподобном черном слое с малой примесью обломочного материала (колонка № 14) SiO<sub>2биог.</sub> достигает 10.2 % (см. рис. 3). Величина магнитной восприимчивости осадков обратно пропорциональна содержанию биогенного кремнезема [Вологина и др., 2007б].

**Содержания органического углерода** в отложениях, вскрытых керном № 14, варьируют в широких пределах и хорошо коррелируют с SiO<sub>2биог.</sub> (см. рис. 3). Минимальные концентрации C<sub>орг.</sub> (<1 %) характерны для песков нижней части колонки (интервал 60—97 см), максимальные (до 25 %) соответствуют черному торфоподобному слою (интервал 33—54 см). В верхней части разреза (0—33 см) содержания C<sub>орг.</sub> изменяются от 0.1—2.0 % в алевритопесчаных осадках до 17 % в прослоях, обогащенных растительными остатками (см. рис. 3).

**Результаты диатомового анализа** приведены в таблице. Было просмотрено 5 образцов, отобранных из колонки № 14 с глубин от поверхности осадков 2, 22, 39, 44 и 79 см. Обнаружена довольно богатая диатомовая флора, содержащая 103 вида и внутривидовых таксона, принадлежащих к 35 родам. Наибольшее видовое разнообразие характерно для донных диатомей—представителей рода *Navicula* Vory (10 таксонов), а также диатомей обрастаний, относящихся к родам: *Gomphonema* (Ag.) Ehr. (8), *Pla-*



**Рис. 2. Стрoение разрезов и магнитная восприимчивость (МВ) осадков, вскрытых в зал. Провал.**

1 — диатомей, 2 — пелит, 3 — алевроит, 4 — песок, 5 — растительные остатки, 6 — окисленный осадок, 7 — восстановленный осадок, 8 — черные слои, 9, 10 — границы слоев: 9 — четкие, 10 — нечеткие. Т — турбидиты.

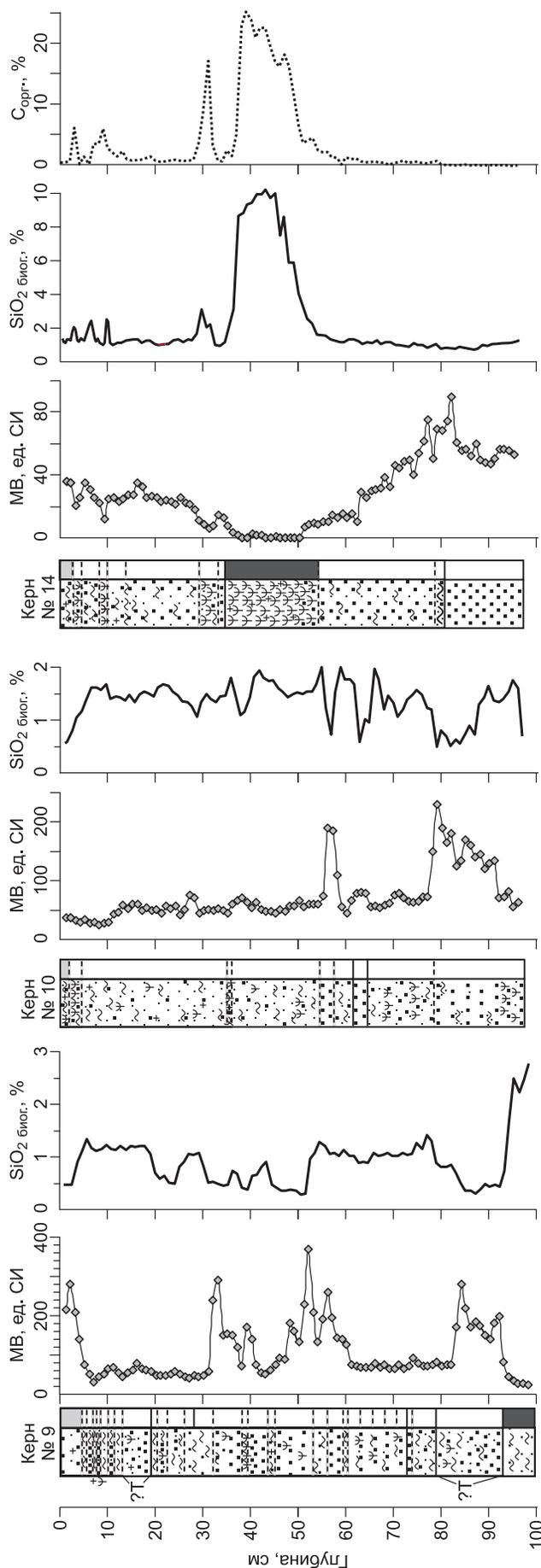


Рис. 3. Магнитная восприимчивость (МВ), содержания биогенного кремнезема ( $SiO_{2\text{биог.}}$ ) и органического углерода ( $C_{\text{орг.}}$ ) в донных отложениях из зал. Провал.

Усл. обозн. см. рис. 2.

*nothidium* Round et Bukht. (8), *Cocconeis* Ehr. (6) и *Epithemia* Breb. (6). По обилию же створок последовательность иная. Во всех пробах отложений преобладают обрастатели (54—89 %) из родов: *Staurosirella* Will. et Round, *Pseudostaurosira* (Grun.) Will. et Round, *Martyana* Round, *Karayevia* Round et Bukht. и *Planothidium* Round et Bukht. Однако доминирующие виды и внутривидовые таксоны лидирующих родов распределены неравномерно по колонке № 14.

В период накопления осадков нижнего песчаного слоя, отобранных на глубине 79 см, диатомовая флора не имела большого развития. Здесь найдено всего 12 видов и разновидностей пресноводных диатомей. Преобладают виды обрастаний (75 % от общего содержания створок). Донные диатомеи составляют 23 %, планктонные — отсутствуют. Общее содержание створок крайне незначительное — 0.04 миллиона на грамм воздушно-сухого осадка (млн ств./г) (см. таблицу).

В черном торфоподобном слое (глубины 39 и 44 см) состав диатомовых водорослей существенно богаче: встречено от 35 до 54 таксонов диатомей рода рангом ниже. Резко возрастает и их численность (61.8—95.3 млн ств./г). Господствуют эпифитные виды обрастаний, створки которых составляют 89 %. Внутри группы обрастателей доминирующее положение занимают: *Staurosirella pinnata* (Ehr.) Will. et Round (47—52 %), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grun.) Will. et Round (13 %), *Ps. binodis* (Ehr.) Edlund (11 %). Количество планктонных (1—3 %) и донных (5—7 %) форм довольно небольшое. Обилие диатомей обрастаний свидетельствует о накоплении осадков в мелководном (первые метры), заросшем высшей водной растительностью, бассейне, а незначительное развитие донных представителей приводит к выводу о невысокой его прозрачности.

На глубине 22 см происходит резкое уменьшение общей численности (до 7.3 млн ств./г) и видового разнообразия (до 18 таксонов) диатомей. В составе диатомовых сообществ по-прежнему преобладают обрастатели (89 %). Помимо ранее доминирующих видов *Staurosirella pinnata* (Ehr.) Will. et Round (48 %) и *Pseudostaurosira binodis* (Ehr.) Edlund (14 %) массовой становится *Martyana martyi* (Herib.) Round (11 %). Увеличивается доля донных диатомей (10 %), планктонные виды отсутствуют.

Состав и численность диатомей в донных осадках зал. Провал (колонка № 14)

Глубина, см	Количество таксонов	Численность диатомей									Доминантные диатомей (их доля в %)
		общая	планктонные		донные		обрастания		створки плохой сохранности		
		млн ств./г	млн ств./г	%	млн ств./г	%	млн ств./г	%	млн ств./г	%	
2	46	2.6	0.5	19	0.4	15	1.4	54	0.3	12	<i>Planothidium ellipticum</i> (12)
22	18	7.3	—	—	0.7	10	6.5	89	0.1	1	<i>Staurosirella pinnata</i> (48) <i>Pseudostaurosira binodis</i> (14) <i>Martyana martyi</i> (11)
39	54	61.8	1.6	3	3.3	5	55.2	89	1.6	3	<i>Staurosirella pinnata</i> (52) <i>Pseudostaurosira binodis</i> (11)
44	35	95.3	0.8	1	7.1	7	84.4	89	3.0	3	<i>Staurosirella pinnata</i> (47) <i>Pseudostaurosira brevistriata</i> (13)
79	12	0.04	—	—	0.009	23	0.03	75	0.006	2	—

Примечание. Глубины 79, 44 и 39 см соответствуют отложениям оз. Белое (на 79 см отмечен песчаный материал, на 44 и 39 см — торфоподобный осадок); 22 и 2 см соответствуют осадкам зал. Провал (на 22 см вскрыты отложения, сформированные до ввода Иркутской ГЭС, на 2 см — осадки, образованные после ввода Иркутской ГЭС).

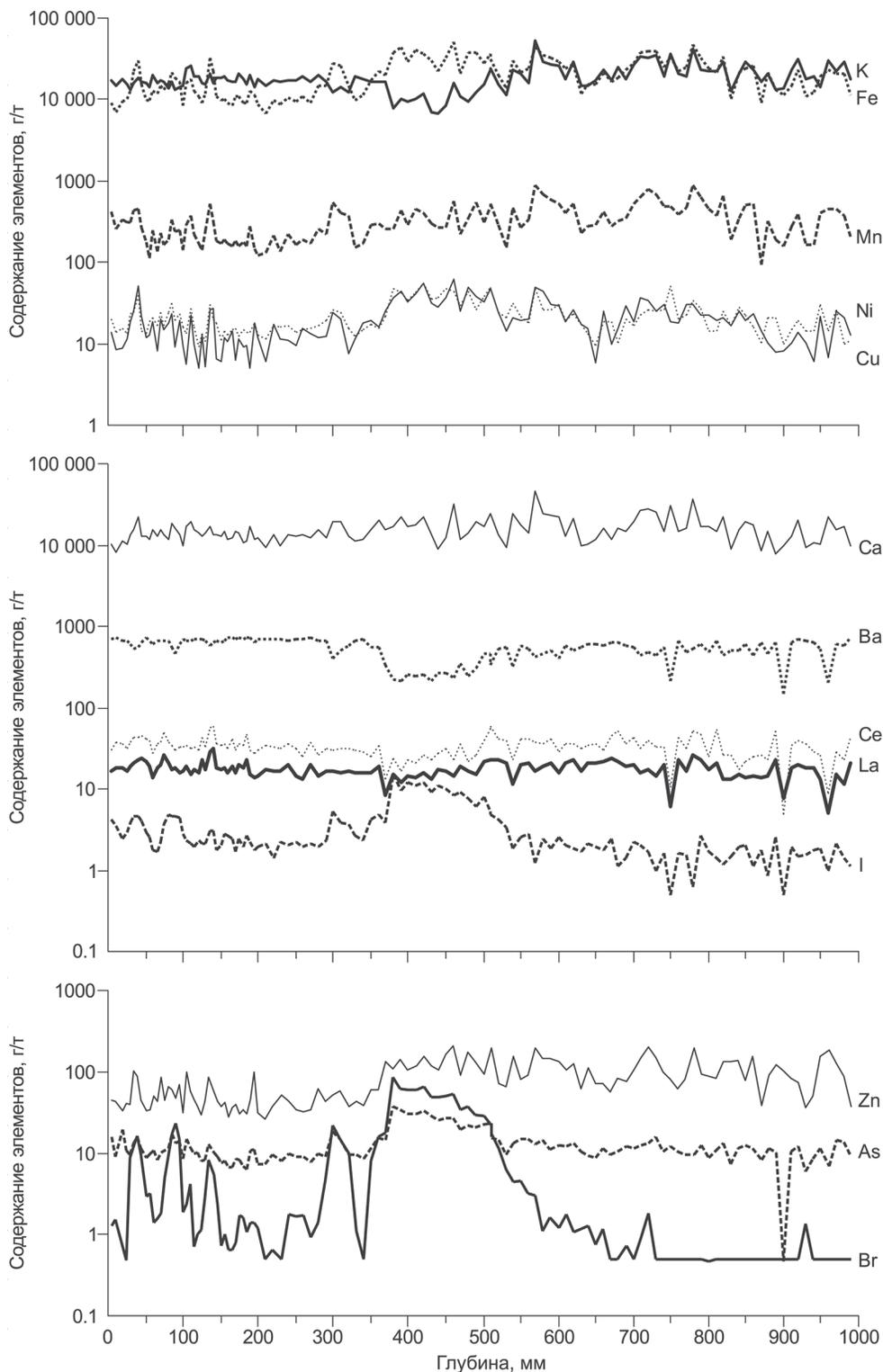
В самой верхней части колонки (глубина от поверхности осадков 2 см) происходит существенная перестройка диатомового комплекса. Больше развитие получили планктонные диатомей (19 %), доля обрастателей сократилась (54 %), а роль донных представителей возросла (15 %). Общая численность диатомей понизилась до 2.6 млн ств./г, а число видов и разновидностей заметно увеличилось (до 46 таксонов). Происходит смена доминирующих видов: на первое место по численности выходит обрастатель *Planothidium ellipticum* (Cl.) M.B. Edlund (12 %). Значений субдоминантов, составляющих 5—10 %, достигают обрастатели: *Achnanthes striata* var. *rostrata* Skabitsch. (редкая пресноводная байкальская разновидность) и *Karayevia clevei* var. *rostrata* (Hust.) Bukht. (разновидность, характерная для глубоководных биоценозов), а также планктонные виды: *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cl. et Möll. и *St. hantzschii* f. *tenuis* (Hust.) Nak. et Stoermer. Массовый ранее вид *Staurosirella pinnata* (Ehr.) Will. et Round утрачивает свое доминирующее значение (содержание до 4 %). Найдена группа диатомей, характерных для песчаных, хорошо аэрируемых мелководий олиготрофных озер: *Cocconeis neodiminuta* Kram., *C. neothumensis* Kram. и *C. placentula* var. *euglypta* (Ehr.) Grun. Среди планктонных диатомовых водорослей встретилась *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Sim. Изученный комплекс содержит также байкальские эндемичные виды (8 % от общей численности). Выделенный диатомовый комплекс по экологии и систематическому составу соответствует современному диатомовому комплексу заливов и соров оз. Байкал [Поповская, 1977].

Датирование отложений колонки № 14 по <sup>210</sup>Pb показало, что осадки на глубине 23.2 см от поверхности дна имеют возраст 100 лет. Таким образом, скорость современного осадконакопления в месте отбора керна № 14 равна 0.232 см/год. Следовательно, осадок мощностью 33 см, перекрывающий черный торфоподобный слой, накапливался примерно в течение 142 лет, что близко соответствует времени, прошедшему с момента землетрясения 1862 г. В центральной части залива, по оценке А.К. Тулохонова с соавторами [2006], среднегодовое накопление осадков составляет 1.07 см. Таким образом, скорости осадконакопления в разных местах зал. Провал резко отличаются и напрямую зависят от близости р. Селенга.

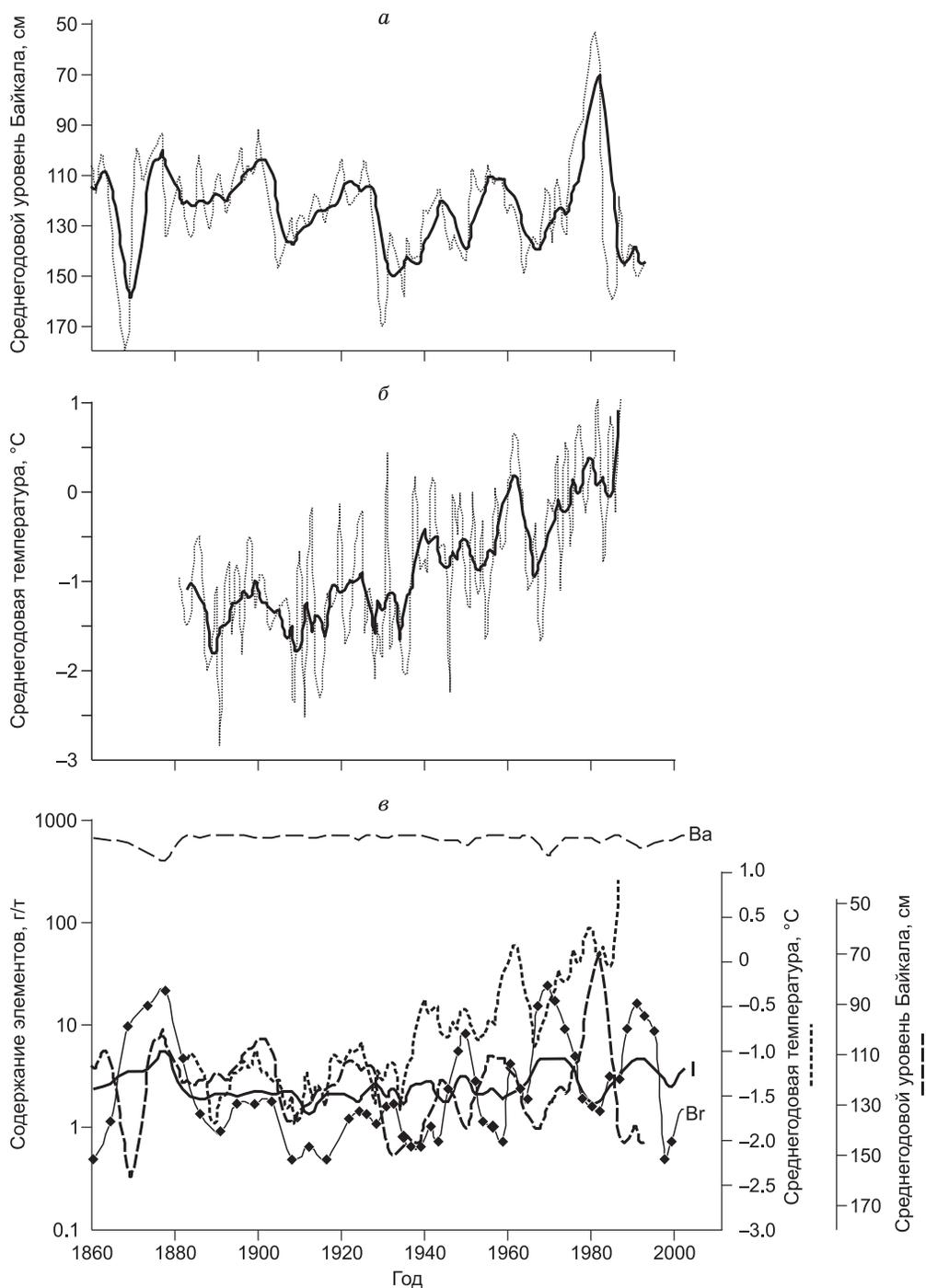
Проведенные комплексные исследования отложений колонки № 14 подтверждают, что наряду с отложениями зал. Провал здесь вскрыты осадки погребенного оз. Белое (см. рис. 1). Вероятно, песчаные отложения в нижней части колонки (интервал 54.5—97.0 см) соответствуют раннему этапу существования этого озера. Диатомовая флора в это время не имела большого развития, преобладали виды обрастаний. Затем озеро стало зарастать. В это время происходило формирование торфоподобного слоя (интервал 34.0—54.5 см, см. рис. 2, 3). Диатомовый анализ свидетельствует о том, что на этом этапе озеро было мелководное (первые метры) и эвтрофное. Осадки, залегающие на торфоподобном слое (колонка № 14, интервал 0—34 см, см. рис. 2, 3), накопились в новообразованном заливе Байкала — Провал. Две пробы (глубины от поверхности осадков 2 и 22 см) существенно отличаются между собой по количеству и составу диатомей (см. таблицу). Вероятно, это связано с изменением условий осадконакопления в заливе после ввода в действие Иркутской ГЭС в 1959—1964 гг. За период, прошедший с этого времени, при скорости осадконакопления 0.232 см/год должен был отложиться осадок мощностью 10—11 см. Таким образом, отложения на отметке 22 см накопились, вероятно, до строительства Иркутской ГЭС, а осадки на отметке 2 см — после строительства.

**Геохимические исследования.** Распределение химических элементов по колонке № 14 приведено на рис. 4.

Выделенные по литологии и распределению остатков диатомовых водорослей осадки оз. Белое (интервал 34—97 см по керну — отложения, сформированные до 1862 г.) и зал. Провал (интервал 0—34 см от поверхности осадков — отложения, образованные с 1862 по 2005 г.) различаются также по уровню содержания элементов. При этом, если содержания Ba, Ce, La, As, Ga в осадках зал. Провал и оз. Белое близки, то таких элементов, как Fe, Mn, Ni, Cu, Ti, V и особенно Zn, в верхнем слое меньше



**Рис. 4.** Содержания химических элементов в донных осадках, вскрытых колонкой № 14.



**Рис. 5. Колебания среднегодовой температуры, уровня оз. Байкал и геохимического отклика донных осадков на историческом отрезке (1862—2000 гг.).**

Тонкие линии — среднегодовые значения, жирные — сглаженные окном 5.

*a* — среднегодовой уровень оз. Байкал [Леви и др., 2003] после 1955—1958 гг. с вычетом 80 см, поправка на заполнение водохранилища, шкала обратная; *b* — ежегодные температуры (°C) по метеостанции Иркутск [Леви и др., 2003]; *v* — содержания Br, I, Ba (г/т) в осадочной колонке № 14, измеренные с шагом 0.5—1.0 см методом РФА-СИ.

(см. рис. 4). Вероятно, эти отличия связаны с различными источниками материала. Особенно выделяются осадки торфоподобного слоя (34—54.5 см) за счет резкого увеличения содержаний I и Br (см. рис. 4), типичных органофильных элементов, ассоциирующихся с высокими концентрациями в этом интервале  $C_{орг.}$  и  $SiO_{2биог.}$  (см. рис. 3). Повышены в этом слое также содержания As, Zn, Ni, Cu, а концентрации терригенных компонентов K, Ba, Се, La снижаются или остаются на уровне подстилающего песчаного слоя (54.5—97 см), сформировавшегося в оз. Белое.

Скачки содержаний ряда химических элементов наблюдаются в отложениях, накопленных в зал. Провал (0—34 см от поверхности осадков). По сравнению с нижней частью разреза (15—34 см) в его верхней части (3—15 см) несколько увеличено содержание Fe, Mn, Cu, Ni, As и Ca. Эти изменения проявились начиная с 40-х годов прошлого столетия, когда в связи с военными действиями увеличилась антропогенная нагрузка на Прибайкалье за счет интенсивного транспортного движения по железной дороге. В последние 15 лет (0—3 см), в связи с падением промышленного производства, концентрации всех этих элементов снизились. Все это говорит о том, что осадки зал. Провал отражают события, связанные с антропогенной нагрузкой на регион.

Содержания органофильных элементов в верхнем слое колонки № 14 отражают колебания температуры воздуха и уровня Байкала за исторический период с 1862 г. по настоящее время (рис. 5). Изменения уровня Байкала, как видно на графиках (см. рис. 5, а, б) и подтверждается коэффициентом корреляции сглаженных величин ( $r = -0.37$ ), находятся в обратной зависимости от температуры [Леви и др., 2003], а состав осадков обычно контролируется этими параметрами. С повышением температуры содержание органического вещества в осадке, представленное Br, I на рис. 5, в, увеличивается. Согласованность температурных максимумов с минимумами уровня Байкала свойственна 1880, 1900, 1926 и 1947 годам, в которых повышено количество брома и отмечены пики органики (см. рис. 3). Таким образом, данный геохимический индикатор, характерный для озерных терригенных осадков [Kalugin et al., 2007], фиксирует также климатические и гидрологические вариации, существовавшие в зал. Провал. В то же время следует отметить, что после 1960 г. корреляция геохимии и внешних условий не обнаружена. В частности, около 1970 и 1980 гг. отмечены соотношения, обратные к выше упомянутым (см. рис. 5). Скорее всего, это связано с нарушением естественного гидрологического режима и изменением источника сноса материала после создания Иркутского водохранилища.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные, полученные при комплексном исследовании верхней части осадков, вскрытых в зал. Провал, позволяют сделать следующие выводы.

1. Сопоставление схемы 1862 г. и современной карты залива показало, что граница дельты р. Селенга за прошедшее с момента землетрясения время сместилась на восток приблизительно на 4 км (см. рис. 1).

2. Скорости современного осадконакопления в разных местах зал. Провал резко отличаются и напрямую зависят от близости р. Селенга.

3. В северо-восточной части зал. Провал наряду с собственными отложениями залива грунтовой трубкой вскрыты осадки оз. Белое, существовавшего в Цаганской степи до землетрясения 1862 г. Диатомовый анализ свидетельствует, что это озеро было мелководное (первые метры) и эвтрофное.

4. Отложения оз. Белое по содержаниям некоторых химических элементов отличаются от перекрывающих их осадков зал. Провал. Концентрации Fe, Mn, Ni, Cu и особенно Zn здесь выше. Кроме того, торфоподобный слой, сформированный в оз. Белое, характеризуется резким увеличением содержания типичных органофильных элементов — I и Br.

5. Содержание Br, отражающее долю органического вещества в донном осадке, контролируется изменениями температуры и уровня озера за период от образования Провала в 1862 г. до 50—60-х годов XX в. Более молодые отложения не обнаруживают корреляции элементного состава с внешними условиями и характеризуются повышенными содержаниями ряда тяжелых металлов (Fe, Ni, Cu, Zn), предположительно за счет увеличения антропогенной нагрузки на экосистему Прибайкалья.

Авторы благодарны Е.В. Иванову за помощь в отборе проб донных отложений и первичной обработке полученных материалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 05-05-97229-р\_байкал\_а, 03-05-65127, 08-05-98100-р\_Сибирь\_а, 08-05-98108, 09-05-13505-офи\_ц) и интеграционных проектов № 92, 120 СО РАН.

## ЛИТЕРАТУРА

Аксенов В.В., Лапин С.С. О теории и аппаратуре индукционного метода измерений магнитной восприимчивости образцов горных пород // Физика Земли, 1967, № 10, с. 106—112.

**Вологина Е.Г., Калугин И.А., Осуховская Ю.Н., Штурм М., Игнатова Н.В., Радзиминович Я.Б., Дарьин А.В., Кузьмин М.И.** Осадконакопление в заливе Провал (озеро Байкал) после катастрофического затопления прибрежной равнины в 1862 г. // Докл. РАН, 2007а, т. 417, № 4, с. 511—515.

**Вологина Е.Г., Кашик С.А., Штурм М., Ломоносова Т.К., Воробьева С.С., Калашникова И.А., Храмцова Т.И., Тошачов С.Ю.** Результаты седиментологических исследований голоценовых отложений Южной и Средней котловин озера Байкал (на примере скважины BDP-97 и колонковых трубок) // Геология и геофизика, 2007б, т. 48 (4), с. 401—413.

**Выхристюк Л.А.** Аморфный кремнезем в донных осадках Байкала // Литология и полезные ископаемые, 1979, № 1, с. 43—51.

**Голенецкий С.И.** Макросейсмические проявления катастрофического Цаганского землетрясения 1862 г. на Байкале // Физика земли, 1996, № 11, с. 3—13.

**Гольдберг Е.Л., Федорин М.А., Грачев М.А., Золотарев К.В., Хлыстов О.М.** Геохимические индикаторы изменений палеоклимата в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (1—2), с. 76—86.

**Давыдова Н.Д., Стрельникова Н.И.** Первое Всесоюзное совещание по методике диатомового анализа // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1979, т. 111, вып. 5, с. 461—462.

**Дарьин А.В., Золотарев К.В., Калугин И.А., Максимова Н.В.** Применение метода РФА СИ для определения микроэлементного состава донных осадков оз. Хубсугул (Монголия). Поиск геохимических индикаторов осадконакопления и вариаций палеоклимата в Байкальской рифтовой зоне // Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2003, № 12, с. 45—48.

**Казенкина Г.А., Ладохин Н.П.** Геоморфология и донные отложения залива Провал // Тр. Восточно-Сибирского геологического института СО РАН, 1961, вып. 3, с. 35—48.

**Ладохин Н.П.** Современные тектонические движения в заливе Провал и методика их изучения // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1960, № 1—2, с. 59—66.

**Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е., Воронин В.И., Глызин А.В., Язев С.А., Баасанджав Б., Нинжбадгар С., Балжинням Б., Буддо В.Ю.** Современная геодинамика и гелиогеодинамика. 500-летняя хронология аномальных явлений в природе и социуме Сибири и Монголии. Иркутск, Изд-во Иркут. ГТУ, 2003, 383 с.

**Мушкетов И.В., Орлов А.П.** Каталог землетрясений Российской империи. Т. 26. СПб., Типография Императорской АН, 1893, 582 с.

**Новый каталог** сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М., Наука, 1977, 535 с.

**Орлов А.П.** О землетрясениях вообще и о землетрясениях Южной Сибири и Туркестанской области в особенности. Вып. 1 // Труды Общества естествоиспытателей при Императорском Казанском университете. Казань, Лито- и типография К.А. Тилли, 1872, т. 3 (1), 78 с.

**Пинегин А.В., Rogozin A.A., Лещиков Ф.Н., Кулиш Л.Я., Якимов А.А.** Динамика берегов озера Байкал при новом уровненом режиме. М., Наука, 1976, 88 с.

**Поповская Г.И.** Фитопланктон озерно-соровой зоны Байкала // Лимнология прибрежно-соровой зоны Байкала. Новосибирск, Наука, 1977, с. 154—175.

**Сгибнев А.С.** О бывшем в Иркутской губернии и Забайкальской области землетрясении. Отчет о действиях Сибирского отдела Императорского Русского географического общества за 1863 г. // Записки Императорского Русского Географического общества. Кн. 1. Приложение 1. СПб., Типография В. Безобразова, 1864, с. 8—25.

**Сейсмическое районирование** Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1977, 301 с.

**Тулохонов А.К., Андреев С.Г., Батоев В.Б., Цыденова О.В., Хлыстов О.М.** Природная микролетопись новейших событий в бассейне озера Байкал // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (9), с. 1043—1046.

**Фитингоф А.** Описание местности при устье реки Селенги, понизившейся от землетрясений 30 и 31 декабря 1861 года // Горный журнал, 1865, № 7, с. 95—101.

**Daryin A.V., Kalugin I.A., Maksimova N.V., Smolyaninova L.G., Zolotarev K.V.** Use of a scanning XRF analysis on SR beams from VEPP-3 storage ring for research of core bottom sediments from Teletskoe Lake with the purpose of high resolution quantitative reconstruction of last millennium paleoclimate // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, v. 543, № 1, p. 255—258.

**Kalugin I., Daryin A., Smolyaninova L., Andreev A., Diekmann B., Khlystov O.** The 800 year long annual records of air temperature and precipitation over Southern Siberia inferred from high-resolution time-series of Teletskoye Lake sediments // Quatern. Res., 2007, v. 67, № 3, p. 400—410.

**Mortlock R.A., Froelich P.N.** A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments // Deep-Sea Research, 1989, v. 36, p. 1415—1426.

**Von Gunten H.R., Sturm M., Erten H.N., Roessler E., Wegmueller F.** Sedimentation rates in the central Lake Constance determined with  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  // Schweiz. Z. Hydrol., 1987, 49, № 3, p. 275—283.

*Рекомендована к печати 5 февраля 2010 г.  
Н.А. Берзиньм*

*Поступила в редакцию  
14 мая 2009 г.*