

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Е.В. Лихошвай, Г.В. Помазкина, А.О. Костюковская, В.Н. Сергеева, О.В. Левина\*

Лимнологический институт СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия  
\*Институт геохимии СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

Для выяснения вклада различных видов диатомовых водорослей в формирование осадка оз. Байкал в разных его участках были отобраны пробы поверхностного слоя (0—1 см) на 82 станциях по всем трем котловинам Байкала. Результаты анализа видового состава показали, что основной вклад по числу панцирей клеток в осадконакопление верхнего слоя донных отложений абиссали вносят планктонные диатомовые водоросли, причем наибольшее значение имеют эндемичные виды *Aulacoseira baicalensis*, *Cyclotella minuta* и *Cyclotella baicalensis*. Роль пенистых бентосных диатомей, выносимых водами р. Селенга, а также обитающих на Селенгинском мелководье, ограничивается прибрежной зоной. В северной части Северной котловины содержание вида *Aulacoseira baicalensis* достигает 87 % от общего числа диатомей и цист, в Средней котловине — 60 %. Споры вида *Aulacoseira skvortzowii* в максимальном соотношении (около 30 % от общей численности) накапливаются в осадках вблизи дельты Селенги и до 20 % — в Южной котловине, в Северной и Средней котловинах их доля не превышала 5 %. В весовом отношении вклад толстостенных панцирей *Aulacoseira baicalensis* самый значительный и составил 0,4 г в 1 г сухого осадка. С учетом средней скорости осадконакопления и средних размеров клеток представлено трехмерное изображение, иллюстрирующее плотность упаковки панцирей диатомей в верхнем слое верхнего осадка, соответствующем ежегодному потоку материала на дно, для котловин Байкала и Селенгинского мелководья.

*Диатомовые водоросли, современное осадконакопление, биогенный кремнезем, оз. Байкал.*

### DISTRIBUTION OF DIATOMS IN SURFACEAL SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL

E.V. Likhoshway, G.V. Pomazkina, A.O. Kostyukovskaya, V.N. Sergeeva, and O.V. Levina

Contributions of various diatom species to deposition were investigated in surfaceal sediments (0—1 cm) sampled at 82 geographically dispersed stations in the three subbasins of Lake Baikal. The species composition shows the highest contribution of plankton diatoms, especially the endemic species of *Aulacoseira baicalensis*, *Cyclotella minuta*, and *Cyclotella baicalensis*, in pelagic regions. The contribution of pennate benthos algae that come with the Selenga and live near the delta is restricted to shallow water along the shore. *Aulacoseira baicalensis* amount to 87 % of the diatoms and cysts total in northern North Baikal and to 60 % in Central Baikal. Spores of *Aulacoseira skvortzowii* have rather high percentages in the Selenga delta region (about 30 %) and in South Baikal (up to 20 %) but are within 5 % in the Northern and Central subbasins. Thick-wall frustules of *Aulacoseira baicalensis* reach the highest weight contents, up to 0.4 g per 1 g of dry sediment. The density of diatom frustules simulated in a 3D model on the basis of mean sedimentation rates and mean cell sizes correlates with mean annual particle fluxes to the three Baikal subbasins and the Selenga delta region.

*Diatoms, surfaceal sediments, biogenic silica, Lake Baikal*

### ВВЕДЕНИЕ

Круговорот кремния в оз. Байкал имеет огромные масштабы. Ежегодно с речными водами в него поступает 631 тыс. т кремнекислоты [1], или 240 тыс. т кремния, из которых основная часть приходится на истинно растворенную форму [2, 3]. Ключевую роль в круговороте кремния играют диатомовые водоросли. На их долю приходится до 95 % первичной продукции в весенний наиболее продуктивный период года. Ежегодный их вклад в осадки озера составляет от 425 до 800 тыс. т кремнекислоты [4, 5].

Озеро Байкал разделено крупными подводными возвышенностями на три котловины, дно каждой представляет равнину глубоководной седиментации. Отложения Северной котловины содержат наибольшее количество биогенного кремнезема — около 50 %. Содержание  $\text{SiO}_2$  биог. уменьшается по направлению к берегам, а также с севера на юг. Селенгинское мелководье представляет собой равнину озерно-аллювиальной аккумуляции, и содержание  $\text{SiO}_2$  биог. здесь составляет всего 5—20 % [1, 6, 7]. К моменту начала наших исследований для нескольких станций было показано изменение состава видов диатомей в верхнем слое донных отложений с севера на юг и от берега к глубинной части [6, 7]. Возросший интерес к оз. Байкал как к хранилищу летописей климатов прошлого [8—10] вдохновил нас на проведение данного исследования. Цель настоящей работы — определить вклад различных видов диатомовых водорослей в

осадконакопление котловин Байкала и Селенгинского мелководья на примере 82 станций с оценкой численности различных видов и массы их панцирей.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб верхнего (1 см) слоя донных отложений производили упрощенной модификацией стратометра, представляющей собой утяжеленную латунным диском пластиковую трубку длиной 30—60 см с клапаном из сплошного листа резины (рис. 1). Пробы отбирали 4—21 июля 1993 г. по сетке на расстоянии 15 км друг от друга в глубоководных котловинах спокойного осадконакопления, на Селенгинском мелководье — через 7,5 км с борта НИС „Титов“ (табл. 1; рис. 2,А). Сразу после отбора контролировалось качество отобранного керна по наличию взвеси хлопьеобразного верхнего слоя. Содержимое трубки выдавливалось поршнем снизу и нарезалось через 0,5 см (от 0 до 3 см), перед анализом равные объемы (0—0,5 и 0,5—1 см) смешивались. Приготовление постоянных препаратов и подсчет диатомей с помощью оптического микроскопа осуществляли в соответствии с рекомендациями PALE [11, 12], при увеличении объектива  $\times 40$ . Содержание биогенного кремнезема определяли известным методом [13], основанным на обработке растертых проб осадка весом 5—30 мг в  $2M Na_2CO_3$  (5 ч при  $86^\circ C$ ) и последующей цветной реакции с молибдатом аммония. Идентификацию видов производили согласно опубликованным диагнозам [14]. Крупные фрагменты створок, по которым можно было определить видовую принадлежность, также учитывали как соответствующие части целого панциря. Массу панцирей диатомовых водорослей определяли исходя из средних размеров представителей видов в пробах и по толщине панцирей, измеренных в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Philips SEM 525M, при этом удельный вес биогенного кремнезема считали  $2,07 \text{ г/см}^3$  [15]. Средние параметры панцирей приведены в табл. 2. Все вычисления и построение графиков производили с помощью Microsoft Excel и программного обеспечения, разработанного в группе научно-технической информации Лимнологического института. Модель расположения клеток диатомей в осадках построена с помощью программы 3D Studio MAX, которая позволяет задать случайное распределение объектов любой формы в определенном объеме по координатам и векторам ориентации. В данном случае в качестве объема был взят параллелепипед на площадке  $1 \times 1 \text{ мм}$  с высотой, равной ежегодному линейному приросту осадков ( $0,043 \text{ см/год}$  для Южной,  $0,035 \text{ см/год}$  — для Средней,  $0,026 \text{ см/год}$  — для Северной котловин и  $0,091 \text{ см/год}$  — для Селенгинского мелководья), по данным Д. Эджингтона с соавторами [16]. Для построения модели использовались также общая численность диатомей, численность доминирующих видов и средние размеры панцирей клеток в верхнем слое донных отложений, определенные с помощью сканирующей электронной микроскопии (см. табл. 2). Данные по численности брались в точках, наиболее близких к приведенным у Д. Эджингтона с соавторами: например, точке 2 с координатами  $51^\circ 44' \text{ N}$ ;  $105^\circ 14' \text{ E}$  в упомянутой работе [16] наиболее соответствует наша точка 14 ( $51^\circ 39' 40'' \text{ N}$ ;  $105^\circ 08' 17'' \text{ E}$ ), точка 4 ( $52^\circ 22' \text{ N}$ ;  $106^\circ 13' \text{ E}$ ) — точка 33 ( $52^\circ 18' 59'' \text{ N}$ ;  $106^\circ 13' 11'' \text{ E}$ ), точка 10 ( $52^\circ 59'$ ;  $107^\circ 51' \text{ E}$ ) — точка 55 ( $52^\circ 59' 10'' \text{ N}$ ;  $107^\circ 53' 48'' \text{ E}$ ), точке 8 ( $53^\circ 55' \text{ N}$ ;  $108^\circ 25' \text{ E}$ ) — точка 98 ( $53^\circ 54' 18'' \text{ N}$ ;  $108^\circ 21' 16'' \text{ E}$ ).

**Рис. 1. Простейшая авторская модификация стратометра для отбора верхнего слоя донных отложений.**

А — при свободном падении вниз резиновый клапан открыт;  
Б — при подъеме лебедкой клапан закрыт, а металлическая пластинка на нем препятствует сминанию и продавливанию в отверстие стратометра.

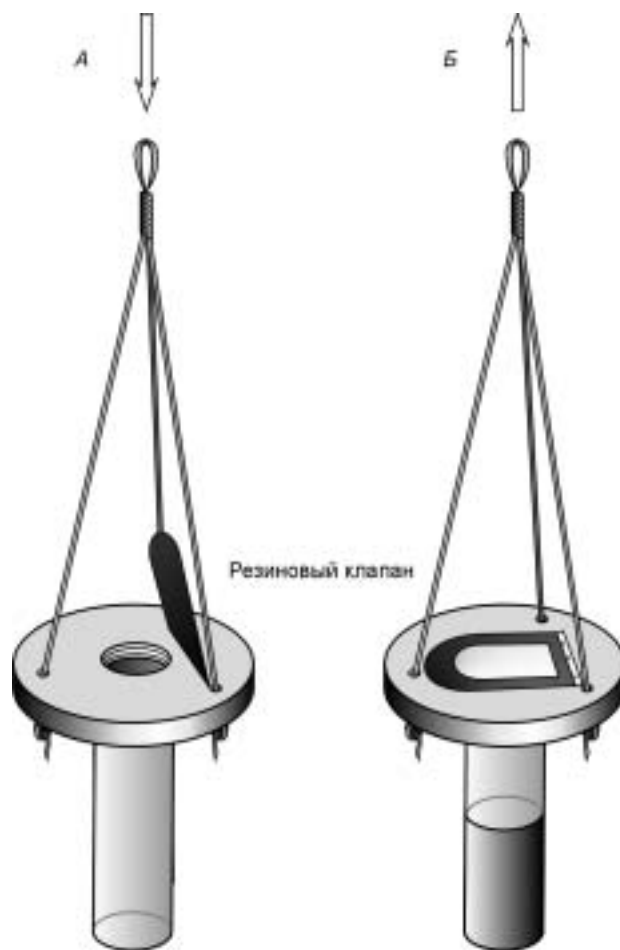
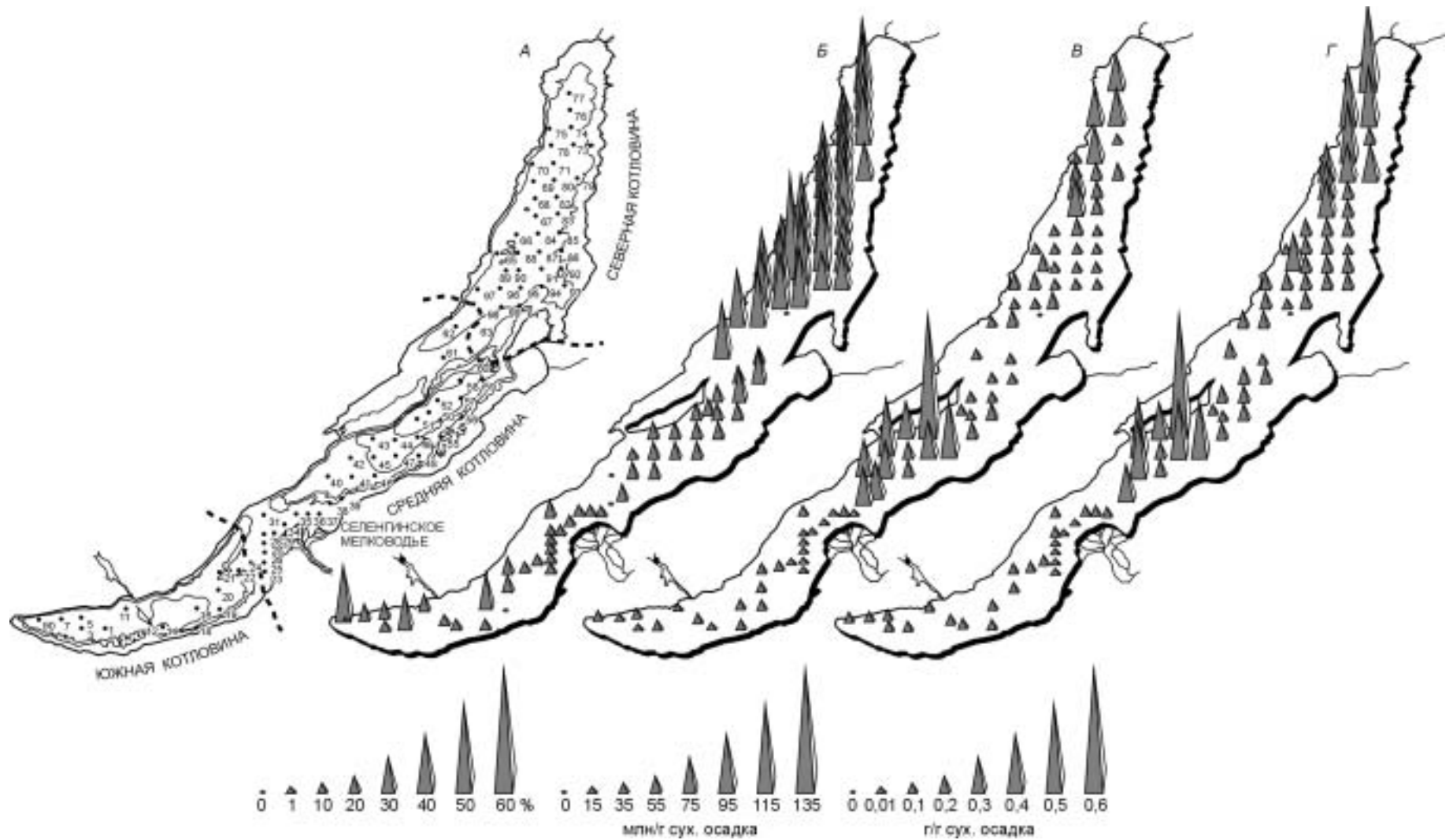


Таблица 1.

## Координаты станций отбора проб на оз. Байкал

№ п/п	Станция	Широта	Долгота	№ п/п	Станция	Широта	Долгота
1	1	51°38'52"	104°35'03"	42	57	53°15'09"	108°06'54"
2	3	51°38'59"	104°22'25"	43	58	53°23'01"	108°06'48"
3	5	51°43'47"	104°21'51"	44	59	53°23'03"	108°20'11"
4	7	51°43'04"	104°10'23"	45	60	53°30'59"	108°19'24"
5	9	51°42'51"	103°57'48"	46	61	53°33'18"	107°58'00"
6	11	51°47'16"	104°47'36"	47	62	53°46'28"	108°06'39"
7	12	51°41'29"	105°00'14"	48	63	53°46'30"	108°19'32"
8	14	51°39'40"	105°08'17"	49	64	53°54'23"	108°45'33"
9	16	51°47'27"	105°27'15"	50	65	54°17'29"	108°34'19"
10	18	51°39'28"	105°26'59"	51	66	54°25'09"	108°46'55"
11	20	51°55'02"	105°40'32"	52	67	54°33'01"	109°00'00"
12	21	52°03'03"	105°40'59"	53	68	54°40'30"	109°00'07"
13	22	52°03'40"	105°51'50"	54	69	54°48'01"	109°00'07"
14	23	52°03'08"	106°07'08"	55	70	54°55'29"	109°00'01"
15	24	52°06'40"	105°59'57"	56	71	54°55'25"	109°13'09"
16	25	52°07'01"	106°07'22"	57	73	55°03'13"	109°26'09"
17	26	52°11'07"	106°07'38"	58	74	55°10'41"	109°26'11"
18	28	52°15'05"	106°07'25"	59	75	55°10'41"	109°12'56"
19	29	52°18'50"	106°07'30"	60	76	55°18'11"	109°26'13"
20	31	52°27'00"	106°07'32"	61	77	55°25'35"	109°25'56"
21	33	52°18'59"	106°13'11"	62	78	55°03'09"	109°13'10"
22	34	52°23'25"	106°20'26"	63	79	54°47'59"	109°26'34"
23	35	52°27'15"	106°26'31"	64	80	54°48'01"	109°12'58"
24	36	52°27'11"	106°33'35"	65	82	54°40'29"	109°13'03"
25	37	52°27'07"	106°40'00"	66	83	54°33'11"	109°13'00"
26	39	52°33'28"	106°53'05"	67	84	54°25'12"	109°00'11"
27	41	52°43'03"	107°00'05"	68	85	54°25'13"	109°13'01"
28	42	52°51'11"	107°00'00"	69	86	54°17'24"	109°13'14"
29	43	52°59'18"	107°13'30"	70	87	54°17'28"	108°59'57"
30	44	52°59'12"	107°27'01"	71	88	54°17'30"	108°46'58"
31	45	52°51'13"	107°13'34"	72	89	54°09'59"	108°39'11"
32	46	52°43'12"	107°13'29"	73	90	54°09'51"	108°47'03"
33	47	52°51'16"	107°26'48"	74	91	54°09'50"	109°00'05"
34	48	52°51'14"	107°40'05"	75	92	54°09'51"	109°12'14"
35	49	52°59'17"	107°39'58"	76	93	54°02'15"	109°13'09"
36	51	53°07'12"	107°40'07"	77	94	54°02'15"	109°00'00"
37	52	53°14'50"	107°53'20"	78	95	54°02'15"	108°46'59"
38	53	53°09'42"	107°47'31"	79	96	54°02'16"	108°34'27"
39	54	53°07'17"	107°53'47"	80	97	54°02'15"	108°21'13"
40	55	52°59'10"	107°53'48"	81	98	53°54'18"	108°21'16"
41	56	53°07'09"	108°06'47"	82	99	53°54'19"	108°34'35"



**Рис. 2. Карта-схема Байкала.**

*A* — точки отбора проб (штриховая линия — границы между климатическими зонами, по [1]); *B* — содержание биогенного кремнезема в верхнем слое донных отложений (%); *V* — общее количество панцирей диатомовых водорослей (млн/г сух. осадка); *Г* — суммарная масса панцирей диатомовых водорослей в верхнем слое донных отложений (г/г сухого осадка), определенная по данным, представленным в табл. 2.

Таблица 2. Средние размеры панцирей клеток в верхнем слое донных отложений, определенные с помощью сканирующей электронной микроскопии

Вид	Высота створки для центрических, длина для пеннатных, мкм	Диаметр панциря для центрических, макс. ширина для пеннатных, мкм	Толщина панциря, мкм	Средний объем клетки, мкм <sup>3</sup>	Вес одного панциря, 10 <sup>-9</sup> г (нг)
<i>Aulacoseira baicalensis</i>	35,48 ± 12,9	15,56 ± 3,01	0,89 ± 0,3	13493,44	6,574
Споры <i>A. skvortzowii</i>	17,84 ± 2,4	10,8 ± 2,7	0,44 ± 0,15	3927,85	1,505
<i>Cyclotella minuta</i>	3,57 ± 1,3	23,5 ± 7,3/21,9 ± 8	0,38 ± 0,16	2886,02	0,988
<i>Synedra acus</i> subsp. <i>radians</i>	192,3 ± 51,5	2,7 ± 1,2	0,4	2133,95	1,638
<i>Stephanodiscus meyerii</i>	2,19 ± 0,9	9,77 ± 1,16	0,12 ± 0,04	329,03	0,069
<i>Asterionella formosa</i>	60	3,5	0,15	630	0,177
<i>Stephanodiscus</i> spp.	2,13 ± 0,6	6,6 ± 1,8	0,1	145,74	0,031

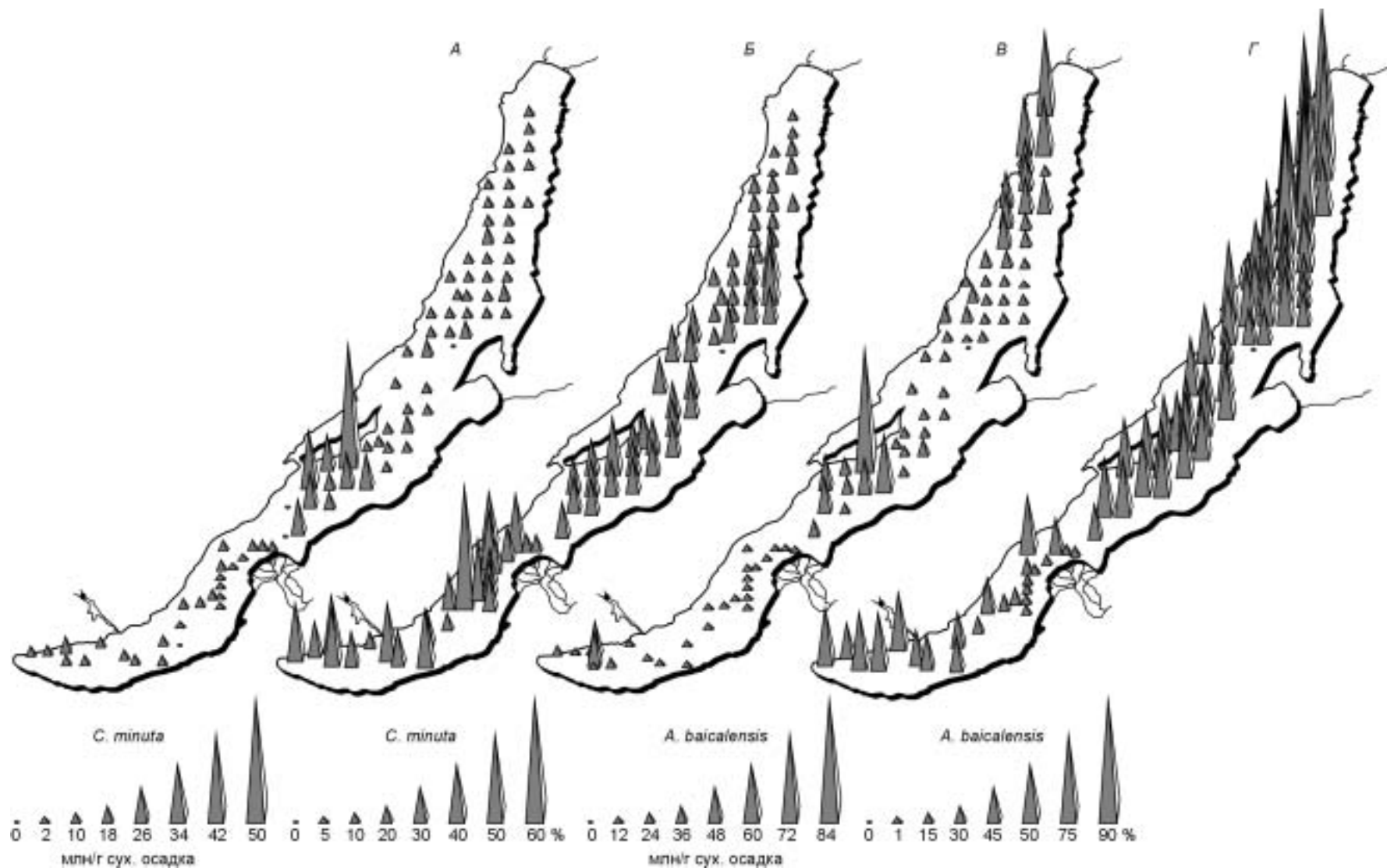
## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2,Б видно, что содержание биогенного кремнезема максимально в Северной котловине, особенно в северной ее части, достигая 49 %. Распределение диатомовых водорослей по котловинам также неравномерное: максимум наблюдается в Средней котловине (до 135 млн панцирей на 1 г сухого осадка) и в северной части Северной (до 77 млн панц./г сух. осадка), в Южной отмечено до 31 млн панц./г сух. осадка. На всех станциях Селенгинского мелководья это значение составляло 15—23 млн панц./г сух. осадка (см. рис. 2,В). Исходя из концентрации панцирей клеток каждого вида и их массы, определенной по данным, представленным в табл. 2, вычисляли суммарную массу панцирей всех видов диатомей в верхнем слое донных отложений. Видно, что наибольшие значения наблюдаются в северной части Северной и в центральной части Средней котловин (см. рис. 2,Г).

Какие виды вносят основной вклад в современное осадконакопление? Есть ли различия в соотношении видов в зависимости от места захоронения осадка?

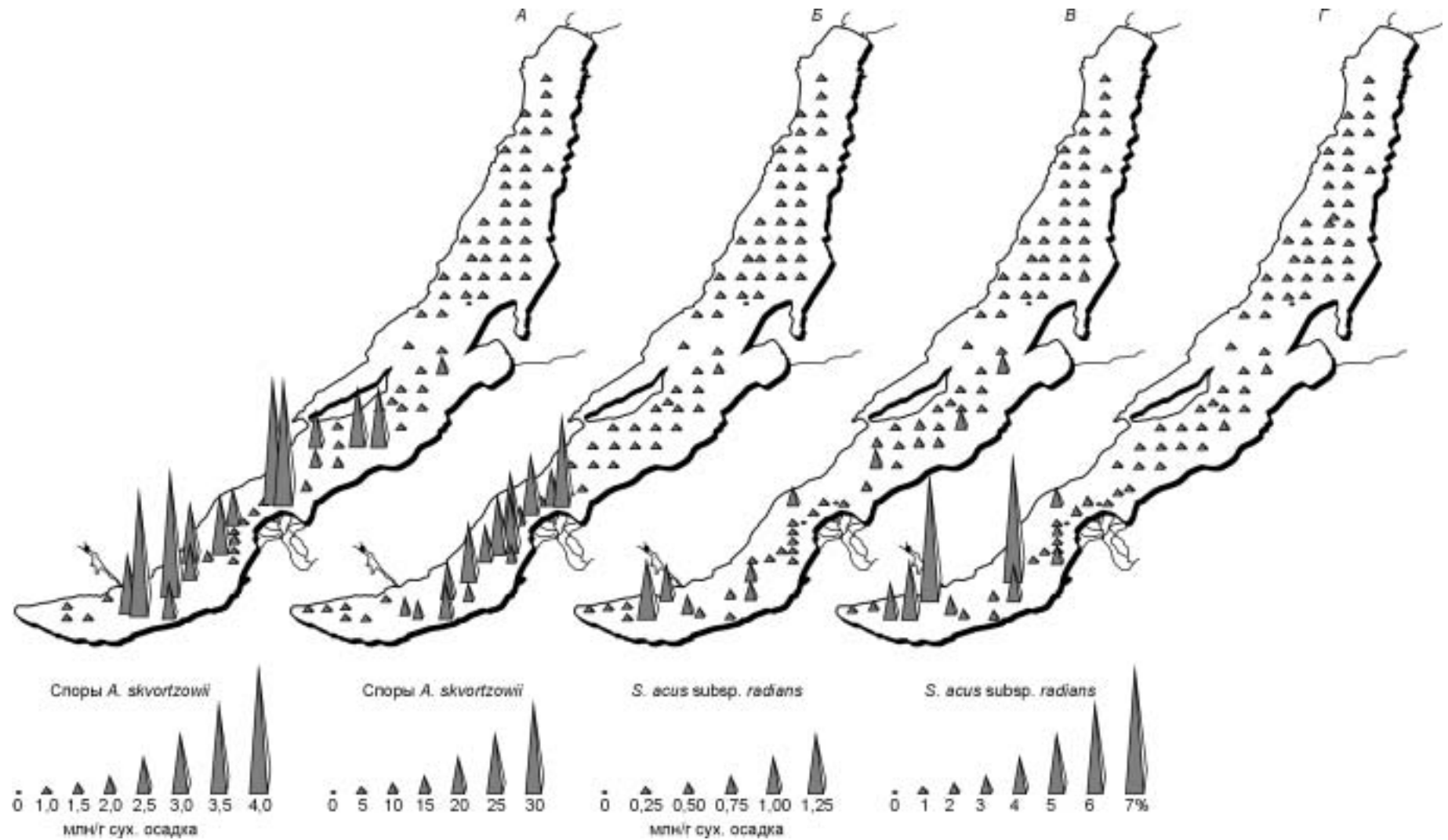
Как видно из рис. 3—6, распределение различных видов диатомей в верхнем слое донных отложений Байкала имеет специфический характер. Эндемичный планктонный вид *Cyclotella minuta* (Skv.) Antipova по числу клеток максимально накапливается в Средней котловине (см. рис. 3,А), но, как следует из рис. 3,Б, на долю этого вида приходится до 30—50 % от общего содержания створок диатомей в Южной, Средней и южной половине Северной котловин. Другой эндемик *Aulacoseira baicalensis* (К. Meyer) Simonsen в максимальном количестве накапливается в верхнем слое Средней котловины — до 84 млн панц./г сух. осадка, до 72 млн — в Северной и до 48 млн — в Южной котловинах (см. рис. 3,В). На этот вид приходится до 87 % всех обнаруженных створок диатомей в Северной котловине, до 60 % — в Средней и до 55 % — в Южной (см. рис. 3,Г). Эндемичный для Байкала вид *Cyclotella baicalensis* в верхнем слое осадков встречался реже. Его максимальное количество отмечалось в Средней (до 9,8 млн панц./г) и в южной части Северной котловин (до 7,5 млн панц./г), где на ст. 99 отмечено его максимальное относительное содержание — 27 %.

Другие виды диатомей в современное осадконакопление Байкала вносят меньший вклад, но обращают на себя внимание особенностями распределения по котловинам. Вид *Aulacoseira skvortzowii* Edlund, Stoermer, Taylor (спорообразующая *Aulacoseira islandica* (O. Müller) Simonsen из оз. Байкал) представлена в осадке в основном в виде покоящихся спор. В Северной котловине количество спор не превышало 1 млн/г сух. осадка, максимальное содержание отмечено в осадках Южной котловины (до 3,8 млн/г) и Селенгинского мелководья (до 3,9 млн/г) (см. рис. 4,А). Относительное содержание спор в котловинах было невысоким, только в Южной котловине на двух станциях оно составляло 20 %, а в осадках Селенгинского мелководья могло достигать 25—30 % (см. рис. 4,Б). *Synedra acus* subsp. *radians* (Kütz.) Skabitsch. в осадках не превышало 1, 2 млн/г и было максимальным как в абсолютном количестве, так и в относительном содержании в Южной котловине (см. рис. 4,В, Г). *Stephanodiscus meyerii* Genkal et Poroovsk. захоранивается преимущественно в осадках Селенгинского мелководья (до 4, 7 млн/г), где на его долю приходится до 26 % всех диатомей, и в небольшом количестве распространяется на Среднюю котловину (см. рис. 5,А, Б). До 30 % створок на отдельных станциях Селенгинского мелководья приходится на другие мелкоклеточные виды *Stephanodiscus*, среди которых чаще других встречался вид *Stephanodiscus inconspicuus* Makar. et Pomaz., абсолютное их количество невелико, максимальные значения отмечены также на Селенгинском мелководье (см. рис. 5,В, Г). *Asterionella formosa* Hass. обнаружена в небольшом количестве в осадках Южной котловины и Селенгинского мелководья, ее относительное содержание редко превышало 1 % (рис. 6,А, Б). Тонкопанцирные *Nitzschia* обнаружены только на двух станциях в Южной котловине в незначительном количестве, их доля не превышала 0,2 %.



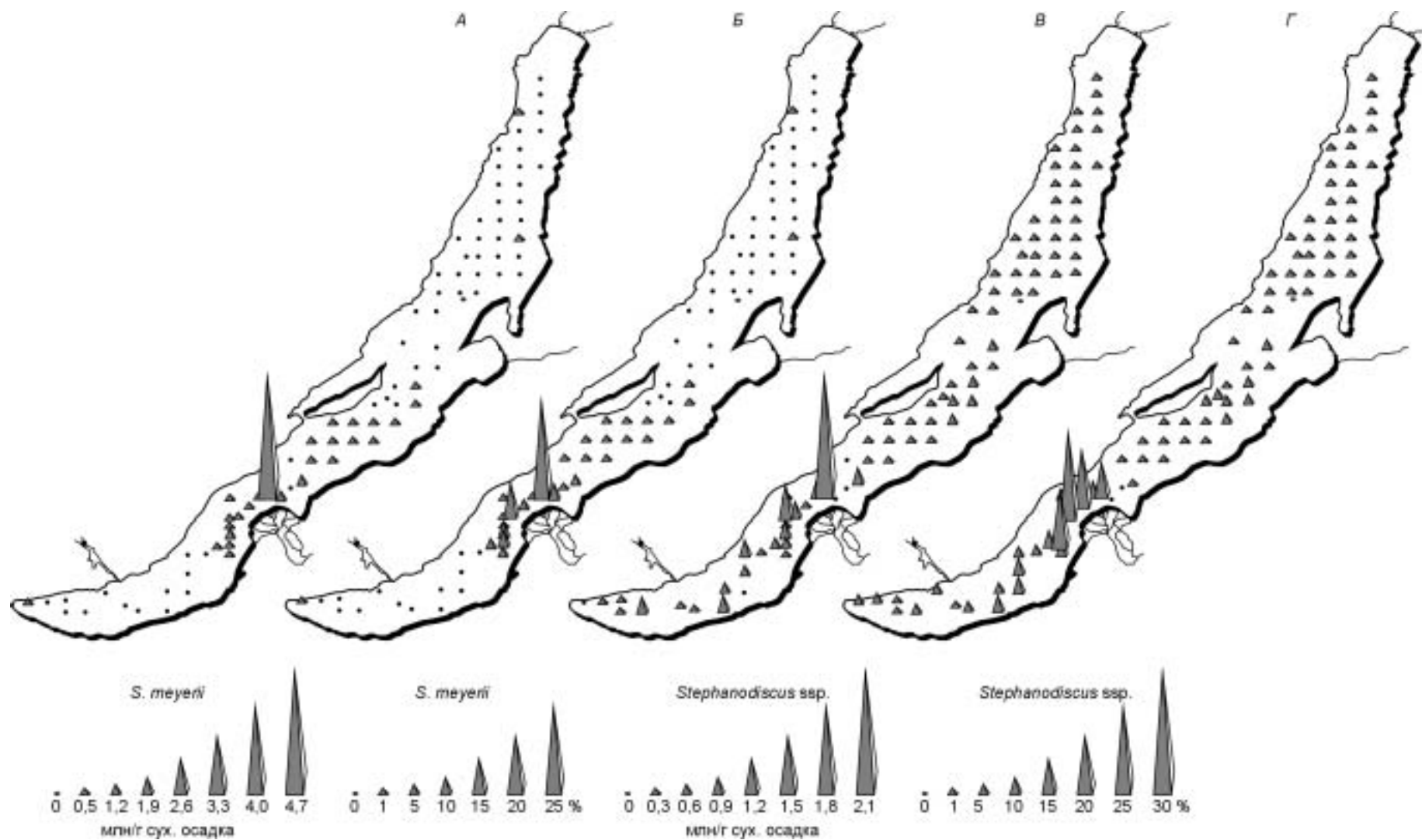
**Рис. 3. Распределение в верхнем слое донных отложений панцирей клеток (млн/г сух. осадка):**

*A* — *Cyclotella minuta*, *Б* — *Aulacoseira baicalensis*; *В*, *Г* — относительное их содержание (%) соответственно.



**Рис. 4.** Распределение в верхнем слое донных отложений, млн/г сух. осадка:

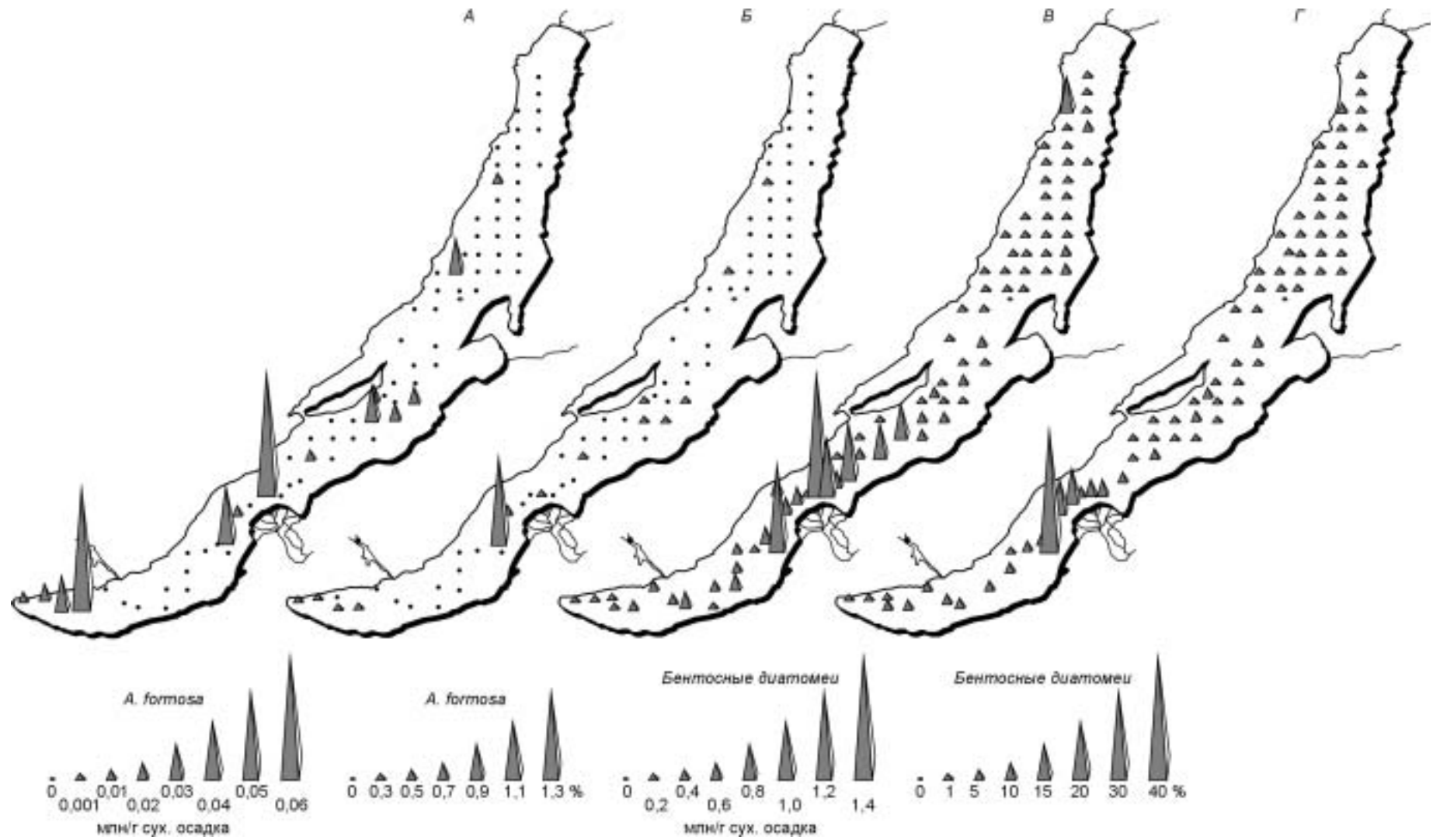
*A* — спор *Aulacoseira skvortzowii*, *B* — панцирей клеток *Synedra acus* subsp. *radians*; *Б, Г* — относительное их содержание (%) соответственно.



**Рис. 5. Распределение панцирей клеток в верхнем слое донных отложений (млн/г сух. осадка):**

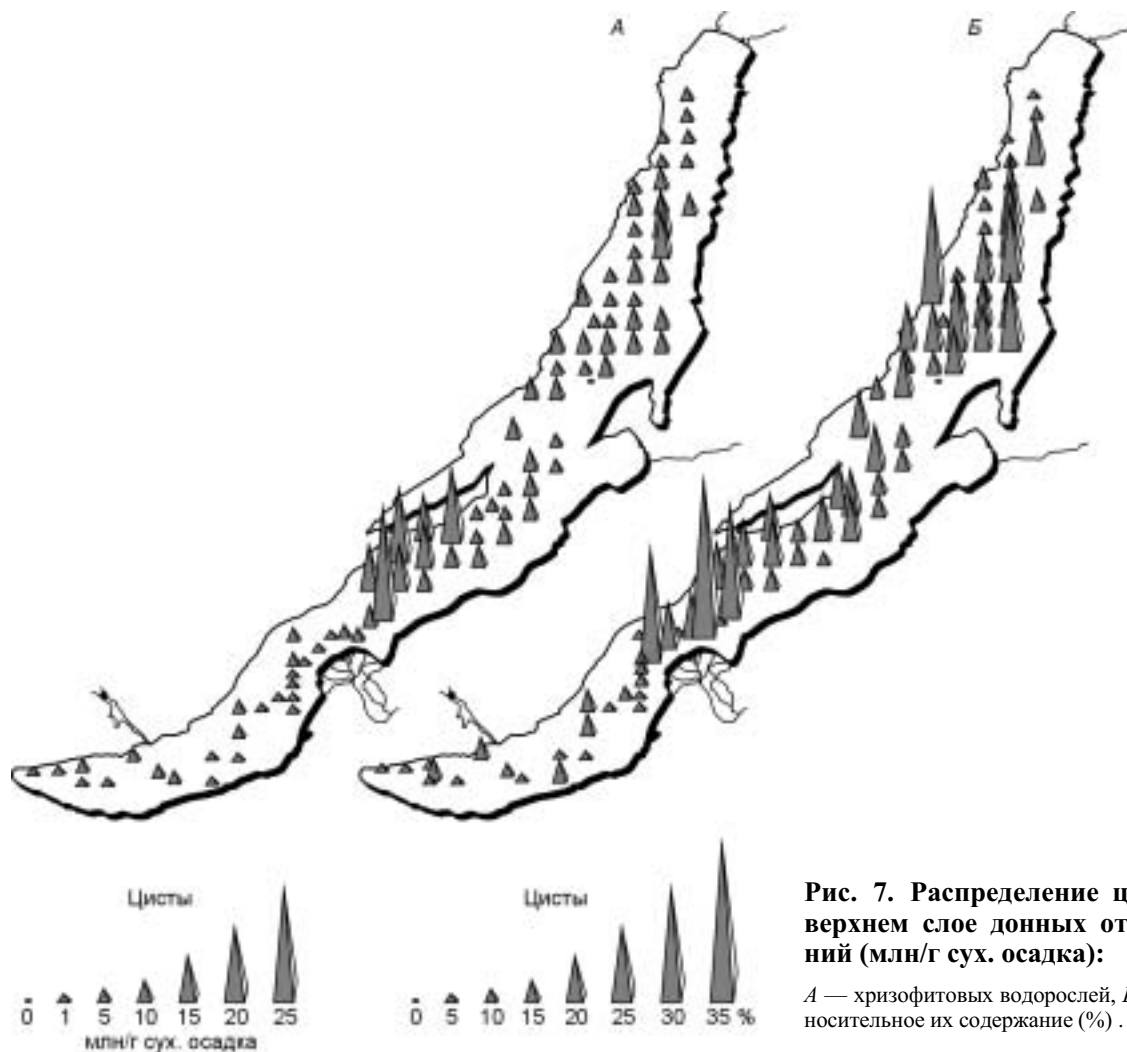
*A* — *Stephanodiscus meyerii*, *B* — мелких клеток *Stephanodiscus*; *Б, Г* — относительное их содержание (%) соответственно.





**Рис. 6. Распределение панцирей клеток в верхнем слое донных отложений (млн/г сух. осадка):**

*A* — *Asterionella formosa*, *B* — бентосных диатомей; *Б*, *Г* — относительное их содержание (%) соответственно.



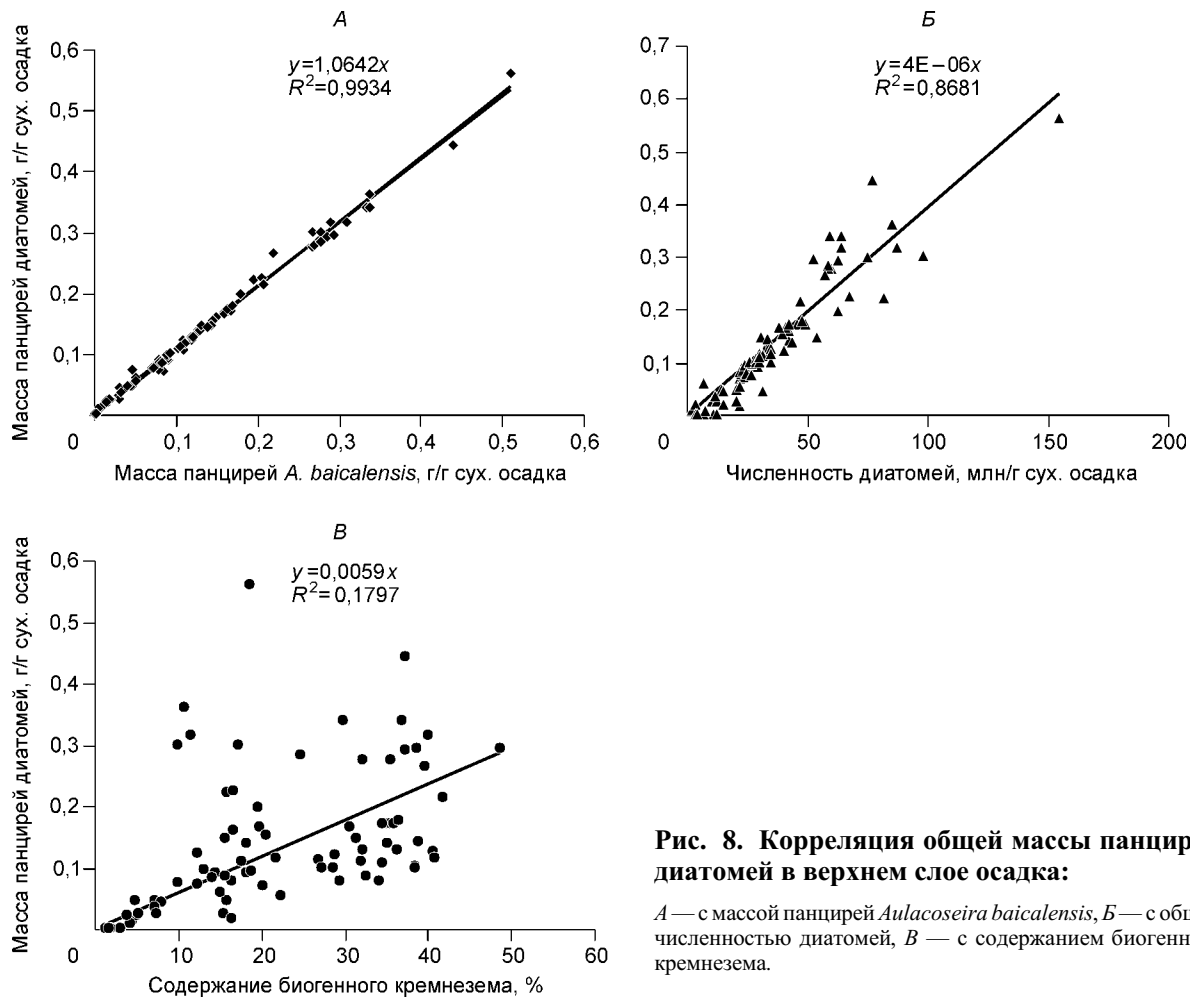
**Рис. 7. Распределение цист в верхнем слое донных отложений (млн/г сух. осадка):**

*A* — хризофитовых водорослей, *Б* — относительное их содержание (%).

Вклад бентосных диатомовых водорослей в осадконакопление абиссали котловин на большей части станций менее 1 % от общей численности диатомей и цист, максимальное содержание их как абсолютное, так и относительное приурочено к Селенгинскому мелководью (см. рис. 6, *B, Г*). То количество, которое распространяется на Среднюю котловину (до 1 млн/г), разбавляется планктонными диатомеями, поэтому не превышает 5 % от общего количества створок в осадках этой котловины.

Другие биологические объекты, часто обнаруживаемые в осадках — это цисты хризофитовых водорослей. Они в количестве до 10,4 млн/г обнаруживаются в Северной котловине и до 24,2 млн/г в нижней части Средней котловины, относительное их содержание достигает 30 % на отдельных станциях Северной котловины и превышает 30 % на одной станции Селенгинского мелководья (рис. 7).

На рис. 8, *A* видно, что общая масса панцирей диатомей, вычисленная, как описано в разделе „Материалы и методы“, положительно коррелирует с массой панцирей вида *Aulacoseira baicalensis*. Этот вид имеет толстостенные панцири, и именно он определяет величину современного биогенного осадконакопления. Отсутствие хорошей корреляции общей численности диатомей с массой всех панцирей (см. рис. 8, *B*) связано с тем, что виды байкальского планктона различаются по весу более чем в 200 раз (см. табл. 2) и при равном вкладе в численность в весе осадка он разный. Отсутствие прямой корреляции общей массы панцирей диатомей с биогенным кремнеземом (см. рис. 8, *B*) связано с ограничениями обоих методов. С одной стороны, даже если брать чистые диатомеи из планктона (июнь 1997 г., доминирование *Aulacoseira baicalensis*), то как с обработкой их перекисью, так и без нее относительное содержание биогенного кремнезема в препарате не превышает 68—72 %. С другой стороны, при микроскопии невозможно учесть мелкие обломки створок, которые дают вклад в относительное содержание биогенного кремнезема, а при определении численности не учитываются. На рис. 9 представлен общий вид осадка, характерного для разных котловин озера и Селенгинского мелководья, при небольшом увеличении в СЭМ. Видно, что наряду с целыми панцирями в осадках присутствуют обломки клеток и помимо



**Рис. 8. Корреляция общей массы панцирей диатомей в верхнем слое осадка:**

*А* — с массой панцирей *Aulacoseira baicalensis*, *Б* — с общей численностью диатомей, *В* — с содержанием биогенного кремнезема.

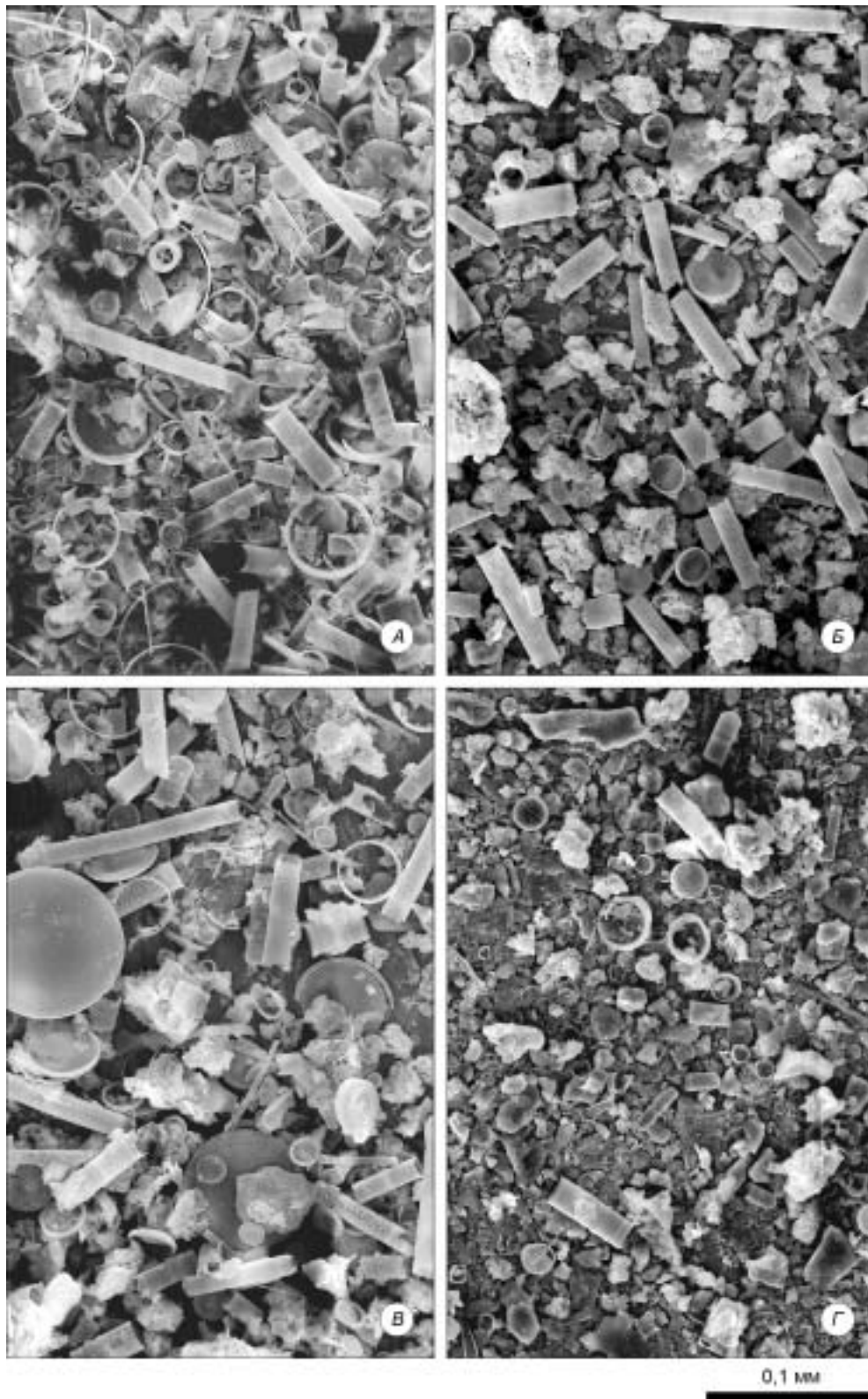
биогенной составляющей, особенно на Селенгинском мелководье, в осадках накапливается терригенная взвесь (см. рис. 9,Г).

С учетом данных о линейном ежегодном приросте осадка (в Северной котловине 0,26 мм, в Средней — 0,35 мм, в Южной — 0,43 мм, на Селенгинском мелководье — 0,91 мм [16]) и наших данных о концентрации основных видов диатомей и среднем размере клеток с помощью программы 3D Studio MAX R3 построена модель расположения диатомей в сухом осадке (рис. 10). Видно, что „пустое“ пространство между клетками в осадках из Северной и Средней котловин практически отсутствует, в осадке из Южной котловины клетки расположены более рыхло, а в осадке из Селенгинского мелководья клетки расположены друг от друга на значительном расстоянии, это „свободное пространство“ как раз и занимает терригенный материал.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

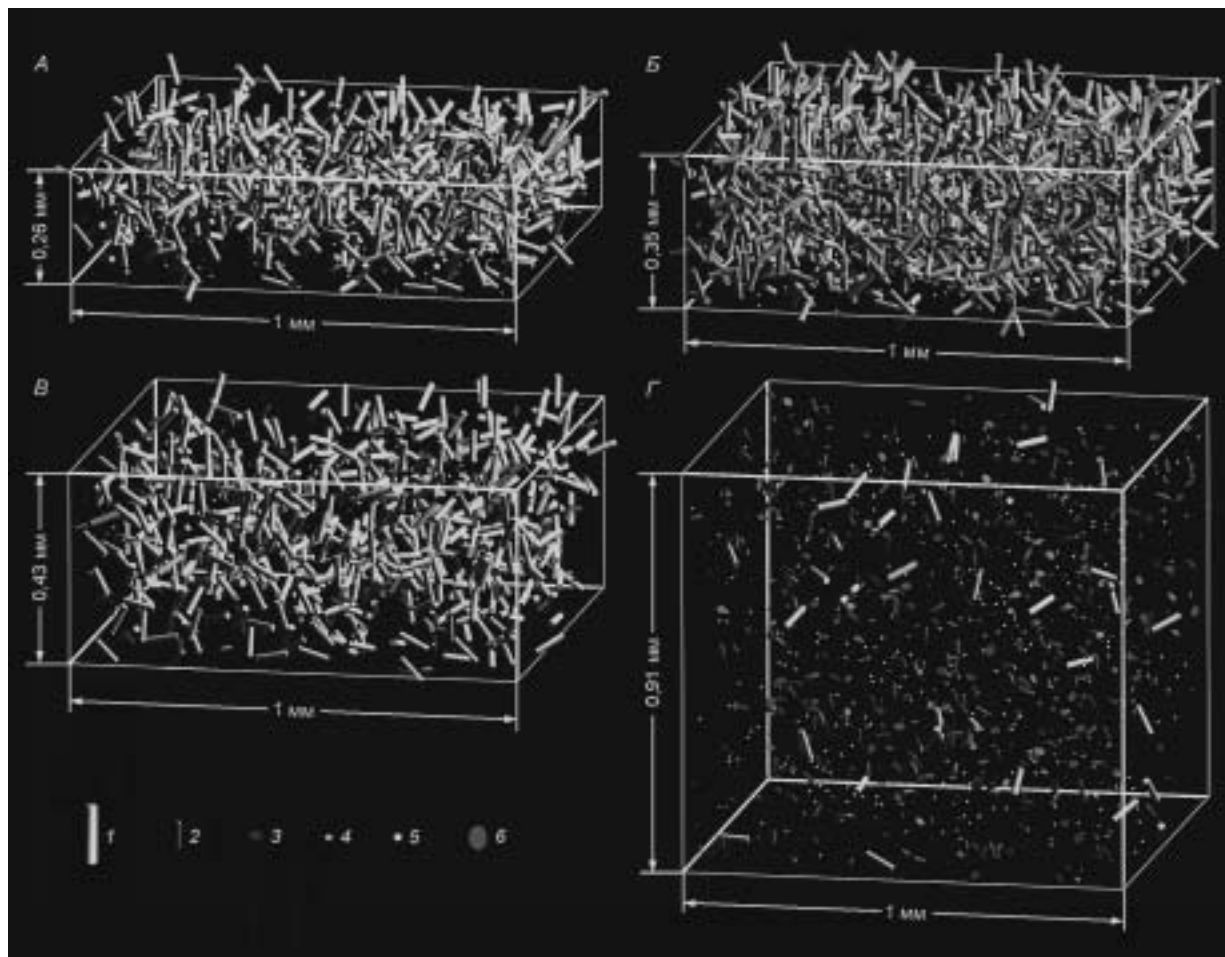
Максимальное значение относительного содержания биогенного кремнезема, которое нам удалось определить, в поверхностном слое донных отложений составило 49 % (в сухом осадке). Это значение соответствует данным К.К. Вотинцева и др. [5, с. 43] по содержанию двуокси кремния в диатомовом фитопланктоне Байкала (47,7 % от сухого вещества водорослей). В опубликованных ранее работах корреляция содержания биогенного кремнезема и количества микрофоссилий в верхнем слое донных отложений Байкала имела большой разброс — одному и тому же относительному содержанию  $SiO_2$  биог. соответствовали различающиеся в 2 раза количества микрофоссилий [6].

Ранее было показано, что скорость осадконакопления в открытых участках озера может различаться в несколько раз [16, 17]. Нами наглядно продемонстрировано, что разность в скорости современного осадконакопления на абиссали и Селенгинском мелководье определяется разбавлением диатомей терригенным материалом (см. рис. 9, 10). Отложение взвешенного материала речного стока в дельтах рек и



**Рис. 9. Общий вид осадка по данным СЭМ.**

*А* — из Северной котловины (станция 78), *Б* — из Средней котловины (станция 48), *В* — из Южной котловины (станция 1), *Г* — из Селенгинского мелководья (станция 28).



**Рис. 10. Схема пространственного расположения клеток доминирующих видов диатомей в слое осадка, соответствующем годовому приросту.**

*А* — в Северной котловине (станция 98), *Б* — в Средней (станция 55), *В* — в Южной (станция 14), *Г* — на Селенгинском мелководье (станция 33). Толщина годового слоя по данным [16]. 1 — *Aulacoseira baicalensis*; 2 — споры *Aulacoseira skvortzowii*; 3 — *Cyclotella minuta*; 4 — *Stephanodiscus* sp.; 5 — цисты; 6 — бентосные диатомовые.

придельтовых пространствах озера, по мнению К.К. Вотинцева [4], является одной из причин разности скорости осадконакопления. Притоки вносят в озеро большой объем воды и взвешенного материала (табл. 3) [2, 18—20]. Крупнейший приток Селенга впадает в Байкал между Средней и Южной котловинами. Благодаря горизонтальным течениям в озере, направленным вдоль восточного берега к северу, наибольшее влияние Селенги испытывает Средняя котловина [1, с. 10; 21]. Исходя из представленных в настоящей работе данных, видно, что максимальные абсолютные значения численности бентосных диатомей приурочены к Селенгинскому мелководью (см. рис. 6, *В*), и можно видеть повышение их численности в южной части Средней котловины (см. рис. 6, *В*). Это виды, выносимые водами Селенги, и представители микрофитобентоса, проживающие в ее болотистой дельте. Из рис. 6, *Г* видно, что максимальное относительное содержание бентосных диатомей приурочено к Селенгинскому мелководью.

Таблица 3. Поступление материала в оз. Байкал с притоками [15—17]

Приток	Объем воды, км <sup>3</sup> /год	Твердый сток, 10 <sup>3</sup> т/год	Растворенный Si, 10 <sup>3</sup> т/год
Общий	58,75		244
р. Селенга	28,9	2700	114
р. Верх. Ангара	8,14	394	28
р. Кичера	0,7	6	
р. Баргузин	3,85	164	13

Таблица 4. Климатические параметры в трех разных котловинах оз. Байкал [1, 20]

Котловина	Глубина, м		Суммарная годовая солнечная радиация, мДж/м <sup>2</sup>	Средняя температура воздуха, °С			Средние даты перехода температуры воздуха через 0°	Продолжительность сезонов года, дни		Средняя продолжительность ледового покрова, дни	Толщина льда в первой декаде марта, см
	макс.	сред.		годовая	января	июля		зима	лето		
Северная	989	564	3980—4190	-3,3	-21,7	12,1	30 апр.—17 окт.	190—205	40—50	134—150	90—100
Средняя	1620	814	4400—4610	-1,6	-19,3	14,6	20 апр.—20 окт.	185—190	45—55	126—130	80—85
Южная	1443	810	4400	-0,7	-17,3	14,4	16 апр.—23 окт.	180—185	45—50	114—128	65—80

Вклад бентосных диатомей в осадконакопление абиссали во всех котловинах в основном не превышает 1 %.

Неудивительно, что содержание бентосных диатомей выше в прибрежных участках, где они произрастают или переотлагаются из мелководья. На примере 16 станций (пробы верхнего слоя байкальских осадков) Е. Штёрмер с соавторами [6, 7] также показали, что на всех станциях доминируют планктонные сообщества, содержание бентосных диатомей увеличивалось в пробах на прибрежных станциях и на станциях в Южном Байкале.

Труднее объяснить неравномерность в распределении планктонных диатомей в верхнем слое донных отложений. Несмотря на то, что все три котловины сообщаются между собой, имеются механизмы, препятствующие миграции и равномерному расселению планктонных организмов. Каждый из представленных в работе видов имеет свои экологические предпочтения. По экологии этих видов имеются опубликованные данные, обобщенные в работах [14, 22]. Также было показано, что во время развития весеннего термобара распределение каждого вида имеет свой особенный характер. Например, во время развития весеннего термобара вид *Stephanodiscus meyerii* не развивается в открытом Байкале, а его максимальные концентрации отмечены в прибрежной зоне и вокруг фронта термобара [22]. В верхнем слое осадка максимальная численность вида как абсолютная, так и относительная отмечена на Селенгинском мелководье и его влияние прослеживается на Среднюю котловину (см. рис. 5, А, Б).

Вид *Asterionella formosa* развивается преимущественно в заливах при температуре воды 8—19 °С, в открытом Байкале присутствует, но максимального развития не достигает [14, с. 66—67], поэтому на современное осадконакопление котловин влияния не имеет, только в одной точке на Селенгинском мелководье его относительная концентрация достигла 1,3 % (см. рис. 6, Б).

*Synedra acus* subsp. *radians* входит в число доминирующих представителей весеннего фитопланктона как открытого Байкала, так и его заливов и соров, максимальной численности достигает при температуре воды 0,1—3 °С, но развивается и при температуре поверхностного слоя воды 13—15 °С. Именно с этим может быть связано его широкое распространение по всей поверхности дна Байкала с доминированием в Южной котловине (см. рис. 4, В, Г).

Почему Северная котловина, особенно северная ее часть, по количеству диатомей заметно отличается от Средней и Южной? Попытаемся разобраться в этом на примере трех абсолютных доминант — *Cyclotella minuta*, *Cyclotella baicalensis* Skv. и *Aulacoseira baicalensis*, на долю которых в верхнем слое осадка приходится до 99,7 % от общей массы панцирей и до 94 % от общей численности диатомей. Оптимальные условия для развития этих видов различны. *Cyclotella minuta* является преимущественно осенневегетирующим видом пелагиали и крупных заливов. Температурный оптимум составляет 5—8 °С [14, с. 52]. *Aulacoseira baicalensis* и *Cyclotella baicalensis* являются характерными представителями весеннего байкальского фитопланктона. Массовое их развитие приурочено к подледному периоду (февраль—май) при температуре воды 0,1—0,2 °С. После вскрытия озера ото льда *Aulacoseira baicalensis* продолжает свое развитие и часто достигает максимальной численности и биомассы при температуре воды 1—3 °С [14, с. 57]. *Cyclotella baicalensis* является одним из самых крупных представителей рода. Максимальная численность (до 50 тыс. кл./л) отмечается в мае—июне при температуре 1—6 °С, иногда в Северной котловине наблюдается осенний максимум. Ранее было показано [23], что за последние 130 лет в Байкале произошло уменьшение относительного содержания *Cyclotella minuta* от 55 до 30 % при неизменном содержании в осадках *Aulacoseira baicalensis* в пределах 25—35 %. По мнению одних авторов [23], это связано с окончанием малого ледникового периода, по мнению других [7] — с воздействием антропогенных факторов. Существенно большую роль в изменении биоразнообразия планктонных водорослей, на наш взгляд, могут играть климатические факторы и обусловленные ими изменения условий обитания водных организмов.

Озеро Байкал вытянуто на 636 км с юга на север, на севере окружено горами. Особенности такого географического положения озера определяют

различный микроклимат в его северной и южной оконечностях. Разделение озера на климатические зоны (Северная, Средняя и Южная) практически совпадает с разделением на котловины (см. рис. 2,А). Основные климатические характеристики этих зон (котловин) приведены в табл. 4 [1, 20]. По данным А.А. Величко с соавторами [24], в координатах 50—57° N; 110° E за последние 14 тыс. лет максимальные изменения средних температур от молодого дриаса до голоценового оптимума составили как для января, так и для июля 4,5 °С, а от голоценового оптимума до н.в. — для января 2 °С и для июля 1 °С. В палеолитописи байкальских осадков в верхнем плейстоцене известны периоды накопления створок этих трех видов в различных соотношениях, и также два комплекса (VII и XIII) с абсолютным доминированием вида *Cyclotella minuta* [25]. За время с начала голоцена в Байкале сменилось 6 комплексов диатомей [26], менялись и доминирующие виды, и их соотношение [27]. Как видно из табл. 4 [1, 20], разница в среднегодовой температуре воздуха в районе Южной и Северной котловин составляет 2,6 °С. Конечно, температура воздуха — это только один из факторов, влияющих на экосистему, но с этим климатическим фактором связаны и многие другие, в частности, продолжительность ледового покрова и толщина льда (см. табл. 4) [1, 20], которые, очевидно, влияют на развитие диатомовых водорослей.

Помимо климата Северная котловина отличается меньшей глубиной, чем Средняя и Южная, и в ней быстрее происходит обмен воды [28]. Очевидно, что этим определяется повышенная концентрация кремния в водах Северной котловины, относительно двух других [29, 30]. Возможно, что всех перечисленных различий достаточно для предпочтительного развития в Северной котловине вида *Aulacoseira baicalensis* на фоне некоторого понижения в ней общей биомассы диатомей.

Таким образом, основной вклад по числу панцирей клеток в осадконакопление верхнего слоя донных отложений абиссали вносят планктонные диатомовые водоросли, причем эндемичные виды *Aulacoseira baicalensis*, *Cyclotella minuta* и *Cyclotella baicalensis*. Роль пеллагиальных бентосных диатомей, выносимых водами Селенги, а также обитающих на Селенгинском мелководье, ограничивается прибрежной зоной. В весовом отношении вклад толстостенных панцирей *Aulacoseira baicalensis* на всех станциях был самым значительным.

Авторы выражают благодарность проф. Г.И. Поповской за полезное обсуждение, Т.О. Железняковой за приготовление постоянных препаратов и А.С. Иванову за выполнение рис. 10.

Работа выполнена при поддержке фонда INTAS-РФФИ (гранты № 95-0646).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Байкал:** атлас. М., Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993, 160 с.
2. **Синюкович В.Н., Сороковикова Л.М., Голобокова Л.П.** Особенности прихода растворенного кремния в озеро Байкал // География и природные ресурсы, 1998, № 2, с. 66—70.
3. **Сороковикова Л.М., Синюкович В.Н., Ходжер Т.В. и др.** Поступление биогенных элементов и органических веществ в оз. Байкал с речными водами и атмосферными осадками // Метеорология и гидрология, 2001, № 4, с. 78—86.
4. **Вотинцев К.К.** К вопросу о современном осадкообразовании в Байкале // Докл. АН СССР, 1967, т. 174, № 2, с. 419—422.
5. **Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И.** Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск, Наука, 1975, 190 с.
6. **Stoermer E., Edlund M., Schelske C.** Distribution and concentration of siliceous microfossils and biogenic silica in surfaceal sediments of Lake Baikal // Diatoms algae as indicators of the changes of climate and environment: Abstrs of Vth Workshop on Diatom Algae. Irkutsk, 1993, p. 122—124.
7. **Stoermer E., Edlund M., Pilskaln C.H., Schelske C.** Siliceous microfossils distribution in the surfaceal sediments of Lake Baikal // J. Paleolimnol., 1995, v. 14, p. 69—82.
8. **Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т. и др.** Глубоководное бурение на Байкале — основные результаты // Геология и геофизика, 2001, т. 42, № 1—2, с. 8—34.
9. **Вильямс Д.Ф., Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А. и др.** Комплексные исследования позднемиоцен-плейстоценовых донных отложений озера Байкал — основа палеоклиматических реконструкций и диатомовой биостратиграфии // Там же, с. 35—47.
10. **Antipin V., Afonina T., Badaliv O. et al.** The new BDP-98 600-m drill core from Lake Baikal: a key late Cenozoic sedimentary section in continental Asia // Quatern. Intern., 2001, v. 80—81, p. 19—36.
11. **Research Protocols for PALE.** Paleoclimates of Arctic Lakes and Estuaries (Issued by PALE Steering Committee. PAGES Workshop Report, series 94-1, Pages Core Project Office). Bern, Switzerland, 1993, 53 p.
12. **Грачев М.А., Лихошвай Е.В., Воробьева С.С. и др.** Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 1997, т. 38, № 5, с. 957—980.
13. **Mortlock R.A., Froelich Ph.N.** A simple method for rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments // Deep-Sea Res., 1989, v. 36, № 9, p. 1415—1426.

14. **Поповская Г.И., Генкал С.И., Лихошвай Е.В.** Диатомовые водоросли планктона озера Байкал (Атлас-определитель). Новосибирск, Наука, 2002, 168 с.
15. **Лисицын А.П.** Основные закономерности распределения современных кремнистых осадков и их связь с климатической зональностью // Геохимия кремнезема / Ред. Н.М. Страхов. М., Наука, 1966, с. 90—190.
16. **Edgington D.N., Van Klump J., Robbins J.A et al.** Sedimentation rates, residence times and radionuclide inventories in Lake Baikal from  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in sediment cores // Nature, 1991, v. 350, p. 601—604.
17. **Mackay A.W., Flower R.J., Kuzmina A.E. et al.** Diatom succession trends in recent sediments from Lake Baikal and their relation to atmospheric pollution and to climate change // Phil. Trans Roy. Soc. Lond., 1998, v. 353, p. 1011—1055.
18. **Власова Л.К.** Речные наносы бассейна озера Байкал. Новосибирск, Наука, 1983, 133 с.
19. **Потемкина Т.Г.** Особенности распределения и химического состава взвешенного вещества в озере Байкал // География и природные ресурсы, 1999, № 3, с. 56—59.
20. **Многолетние данные** о режиме и ресурсах поверхностных вод суши: Государственный водный кадастр, Т. I, вып. 14 (бассейн Байкала). Л., Гидрометеиздат, 1986, 363 с.
21. **Верболов В.И., Покатилова Т.Н., Шимараев М.Н. и др.** Формирование и динамика байкальских вод. Новосибирск, Наука, 1986, 119 с.
22. **Likhoshway Ye.V., Kuzmina A.Ye., Potyemkina T.G. et al.** The distribution of diatom algae near a thermal bar in Lake Baikal // J. Great Lakes Res., 1996, v. 22, № 1, p. 5—14.
23. **Flower R.J., Mackay A.W., Rose N.L. et al.** Sedimentary records of recent environmental change in Lake Baikal, Siberia // The Holocene, 1995, v. 5, № 3, p. 323—327.
24. **Velichko A.A., Andreev A.A., Klimanov V.A.** Climate and vegetation in the tundra and forest zone during the Late Glacial and Holocene // Quatern. Intern., 1997, v. 41—42, p. 71—96.
25. **Likhoshway Ye.V.** Fossil endemic centric diatoms from Lake Baikal. Upper Pleistocene complexes // Proc. 14th International Diatom Symposium, 1996 (S. Mayama, M. Idei & I. Koizumi (eds)). Koenigstein, Koeltz Scientific Books, 1999, p. 613—628.
26. **Bradbury J.P., Bezrukova Ye.V., Chernyaeva G.P. et al.** A synthesis of post-glacial diatom records from Lake Baikal // J. Paleolimnol., 1994, v. 10, p. 213—252.
27. **Безрукова Е.В., Богданов Ю.А., Вильямс Д.Ф. и др.** Глубокие изменения экосистемы Северного Байкала в голоцене // Докл. АН СССР, 1991, т. 321, № 5, с. 1032—1037.
28. **Weiss R.F., Carmack E.C., Koropalov V.M.** Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature, 1991, v. 349, p. 665—669.
29. **Falkner K.K., Church M., Measures C.I. et al.** Minor and trace element chemistry of Lake Baikal, its tributaries, and surrounding hot springs // Limnol. Oceanogr., 1997, v. 42, p. 329—345.
30. **Грачев М.А.** О современном состоянии экологической системы озера Байкал. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2002, 155 с.

*Рекомендована к печати 22 августа 2003 г.  
А.В. Каныгиным*

*Поступила в редакцию 25 февраля 2003 г.,  
после доработки — 12 августа 2003 г.*