

ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ ОБСТАНОВКИ И ДИАТОМОВАЯ ФЛОРА В ОАЗИСЕ ШИРМАХЕРА (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА) В КОНЦЕ ПОЗДНЕГО НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА И В ГОЛОЦЕНЕ

д-р геогр. наук С.Р.ВЕРКУЛИЧ¹, канд. геол.-минерал. наук З.В.ПУШИНА¹,
проф. А.ТАТУР², д-р геол.-минерал. наук Д.А.ГИЛИЧИНСКИЙ³,
канд. геол.-минерал. наук А.А.АБРАМОВ³, проф. М.МЕЛЛЕС⁴

¹ – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: verkulich@mail.ru

² – Варшавский университет, Варшава, Польша

³ – ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ФГБУН ИФХиБПП РАН), Московская область, г. Пущино

⁴ – Кельнский университет, Кельн, Германия

Результаты радиоуглеродного датирования и диатомового анализа донных осадков восьми озер и четырех кернов наземных отложений позволяют описать изменения природной среды и развитие диатомовой флоры оазиса Ширмахера: перед Последним ледниковым максимумом в оазисе существовали мелководные пресноводные озера с диатомовой флорой; повторное заселение оазиса диатомовой флорой началось 7000–6000 л.н.; условия обитания диатомей в озерах оазиса в голоцене были в целом похожи на современные; развитие диатомовой флоры в различных озерах сильно зависело от кратковременных климатических флуктуаций в районе оазиса (относительные потепления 3400–2600, 550–450 и 150 л.н.; относительные похолодания 2200–1000, 300–200 и 100 л.н.) и локальных факторов.

Ключевые слова: Антарктида, оазис Ширмахера, поздний неоплейстоцен, голоцен, донные осадки, керны отложений, радиоуглеродное датирование, диатомовый анализ, палеогеографическая реконструкция.

ВВЕДЕНИЕ

Оазис Ширмахера (Восточная Антарктида) – это свободный от покровного оледенения прибрежный участок суши около 20 км длиной и 1,6 км шириной, окруженный ледниками (рис. 1). Во время Последнего ледникового максимума (ПЛМ) он перекрывался тонким (100–150 м) ледниковым полем, сочленяющимся на северной границе территории с мощным (более 500–600 м) оледенением шельфа. Дегляциация оазиса шла быстро в раннем голоцене примерно до 7000 л.н., замедлилась в период 7000–4000 л.н. и ускорила примерно между 4000 л.н. и 2000 л.н. С 2000 л.н. местное оледенение в целом сокращается [Веркулич и др., 2011].

В ходе сезонных экспедиционных работ 1996–1997 гг. [Schwab, 1998] и 2007–2008 гг. немецкие и российские специалисты отобрали в оазисе колонки донных осадков из восьми озер, а в 2007–2008 гг. – керны наземных отложений [Абрамов и др., 2011]. Одним из объектов исследования этого материала были ископаемые диатомовые комплексы (до сих пор существовали данные лишь о современной диатомовой флоре в озерах оазиса Ширмахера [Алешинская, Бардин, 1965; Лавренко, 1966; Palanisamy,

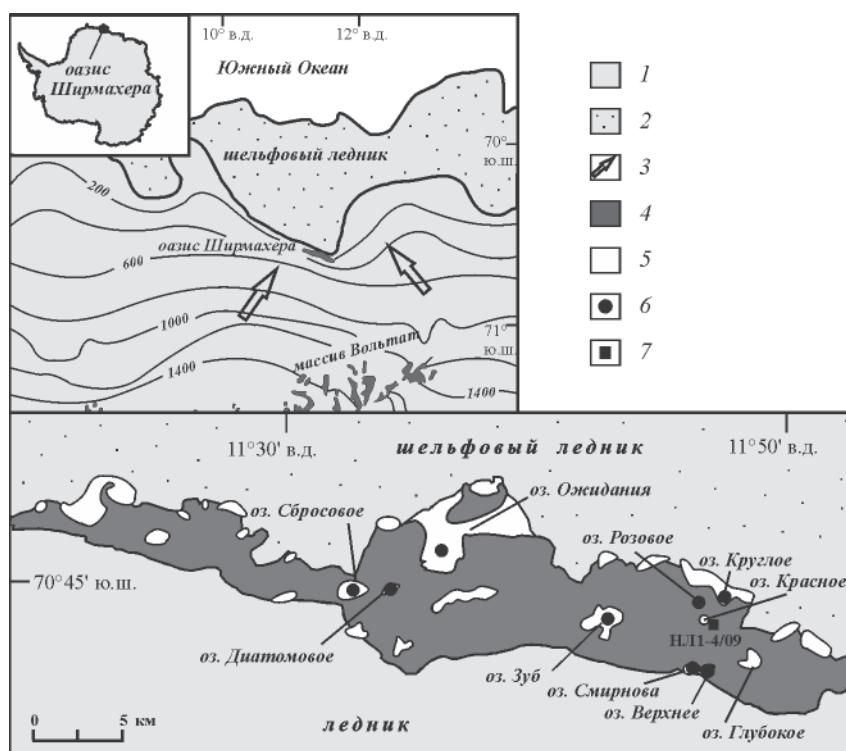


Рис. 1. Ледниковое окружение, схема оазиса Ширмахера и места отбора донных осадков озер и кернов наземных отложений:

1 – континентальный ледниковый покров; 2 – шельфовый ледник; 3 – выводной ледник; 4 – свободная от оледенения суша; 5 – водоемы; 6 – точки отбора донных осадков озер; 7 – место бурения и отбора кернов наземных отложений.

2007]). В статье приводятся и обсуждаются полученные результаты диатомового анализа, которые позволяют уточнить представления о развитии природной среды и диатомовой флоры оазиса с конца позднего неоплейстоцена.

ИССЛЕДУЕМАЯ ТЕРРИТОРИЯ И ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Территория оазиса представляет собой структурно-денудационный мелкосопочник со средними высотами 120–150 м. На юге она граничит с ледниковым склоном, на востоке и западе – с выводными ледниками, на севере – с шельфовым ледником. На северной окраине оазиса располагаются эпишельфовые озера, имеющие гидравлическую связь или слабый обмен с океаническими водами под шельфовым ледником. Ледниковое окружение, солнечная радиация, поверхность суши с альбедо в 2–4 раза меньше, чем у снега и льда, и специфическая атмосферная циркуляция формируют особенности местного климата: средняя температура воздуха составляет здесь $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ при среднемесячных январской $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и июльской $-18,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность воздуха 50 %; среднегодовая скорость ветра 10 м/с; годовая сумма осадков 250 мм, а испарения 350 мм.

Несмотря на малый размер и суровость климата, оазис вмещает около 120 озер [Симонов, 1971]. По своим характеристикам рассматриваемые нами водоемы

Таблица 1

Характеристики водоемов оазиса Ширмахера

по данным

[Дюпманн и Клоков, 1990; Симонов, 1971; Федорова и др., 2011; Bormann & Fritzsche, 1995]

Характеристика	Озеро Смирнова	Озеро Сбросовое	Озеро Зуб	Озеро Верхнее	Озеро Глубокое	Озеро Диатомовое	Озеро Красное	Озеро Розовое	Озера Ожидания, Круглое
Площадь, км ²	0,052	0,18	0,46	0,002	0,13	0,07	0,002	0,002	1,3/0,4
Максимальная глубина, м	24	13	6	10	36,3	8	1,5	1,3	>100/>40
Высота положения озера, м над у.м.	91	1	103	110	83	61	81	59	0
Температура воды, средняя за лето, °С	1,3	3,8	5,2	5,1	3,1	5	5,4	7,3	2,0
Сток вод	есть	есть	есть	есть	есть	нет	нет	нет	–
Минерализация, г/кг	0,005	0,005	0,005	0,011	0,019	0,079	0,45	0,27	0,035
Водородный показатель pH	8,3	8,8	6,4	5,7	6,3	7,3	6,1	7,7	6,5–9,0
Нитраты NO ₃ , мг N/л	0,0032	0	0,001	0	0,005	0,004	0	0	–
Фосфаты PO ₄ , мг P/л	0,0023	0,001	0,002	0,0024	0,123	0,001	0,001	0,001	0,0067–0,04
Аммоний NH ₄ (мг N/л)	0,04	0,014	0,022	0,036	0,132	0,014	0,014	0,014	0,02–0,04
Кислород, % насыщения	93	107,8	107,7	99	84	126,3	115,7	140,1	114–125

(табл. 1) можно разделить на группы. В первую входят озера южной части оазиса (Смирнова, Сбросовое), которые питаются преимущественно талыми ледниковыми водами, имеют сток и вскрываются ото льда не более чем на 1,0–1,5 месяца; для их вод характерны низкие температуры и минерализация, гидрокарбонатно-кальциевый состав. Вторую отчетливую группу составляют небольшие бессточные водоемы с ограниченным питанием, располагающиеся в центре и на севере оазиса (Диатомовое, Розовое, Красное). Летом они освобождаются ото льда на 1,5–2,0 месяца и прогреваются. Минерализация этих озер повышена, а ионный состав вод сульфатно-натриевый (кальциевый) и сульфатно-кальциевый (натриевый). Промежуточные характеристики у озер третьей группы (Зуб, Верхнее, Глубокое). Они имеют смешанное снежно-ледниковое питание, летний сток, вскрываются ото льда на 1,5 месяца, слабо минерализованы. В зависимости от размера, глубин и интенсивности питания эти озера прогреваются летом до разной степени и имеют различный ионный состав (преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый). Отдельную группу составляют

глубокие эпишельфовые озера, круглый год несущие мощный ледовый покров (летом бывают промоины у берегов) и обладающие низкими температурами воды. Несмотря на малую минерализацию, их воды близки по составу к морской воде, что указывает на слабую связь с океаном и на влияние талых вод. О заметной роли стока с континента говорит повышенное содержание калия и пониженные значения рН.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Колонка из озера Зуб была извлечена с помощью бурового комплекса UWITES, позволяющего поднимать первые метры разрезов осадков (до морены) практически в ненарушенном состоянии [Schwab, 1998]. Короткие колонки из озер Смирнова, Верхнее, Сбросовое, Диатомовое, Розовое, Ожидания и Круглое отбирались изготовленным на станции Новолазаревская оборудованием, похожим по конструкции и принципу действия на прямоточную гравитационную трубку ГОИН [Быков, Васильев, 1977]. Керны наземных отложений НЛ1/09–НЛ4/09 были взяты в ходе буровых работ у озера Красное с использованием установки УКБ 12/25, колонковым способом, без промывки и продувки [Абрамов и др., 2011]. Колонки и керны описывались, при необходимости разделялись на образцы и в мерзлом виде вывозились для передачи в лаборатории.

Радиоуглеродное датирование образцов (АМС-метод) выполнялось в лабораториях Польши и Швейцарии. Диатомовый анализ (изучение видового и количественного состава диатомей в осадках) проводился в ФГБУ ААНИИ (Россия). По длине колонок отбирались каждые 1–3 см; в кернах образцы извлекались через 10–35 см, а длина отбираемых интервалов составляла 5–10 см в зависимости от типа отложений. Образцы для исследования были подготовлены по стандартной методике [Диатомовый анализ, 1974]. Изучение диатомей велось с помощью светового микроскопа Amplival при увеличении $\times 1000$. Определение и классификация водорослей проведены с использованием отечественных и зарубежных определителей, с привлечением разнообразной литературы по диатомовым водорослям Антарктиды.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Радиоуглеродный возраст и хронология осадконакопления. Полученные датировки дают сравнительно достоверную временную шкалу накопления водорослевых осадков колонки 1221-5 из озера Зуб: соотношение возраста и глубины залегания осадков показывает, что верхняя часть колонки совпадает с дном водоема (рис. 2). Построение подобной шкалы для озер Диатомовое и Круглое затруднено. В первом из них при отборе был утерян верх колонки длиной около 5 см. Поэтому если хронология формирования разреза между 3375 ± 35 л.н. и 1850 ± 30 л.н. представляется корректной, то для вышележащих осадков она относительна (см. рис. 2). При подъеме осадков озера Круглое был потерян верх колонки длиной до 20 см. Однако сохранившийся остаток ее верхней части имеет возраст около 3000 л.н. (рис. 3), и, значит, потерянный верх колонки был почти полуметровой длины. Это противоречие может объяснить факт осадконакопления в эпишельфовом водоеме, имеющем связь с океаническими массами. Радиоуглеродный возраст подобных осадков в Антарктиде древнее истинного на 1300–1500 лет [Berkman & Forman, 1996]. Введя поправку такой величины в значения датировок, мы получаем вторую кривую их распределения по разрезу, которая лучше согласуется с длиной потерянного верха колонки. В связи с этим хронология осадконакопления строилась по второй кривой, и она относительна.

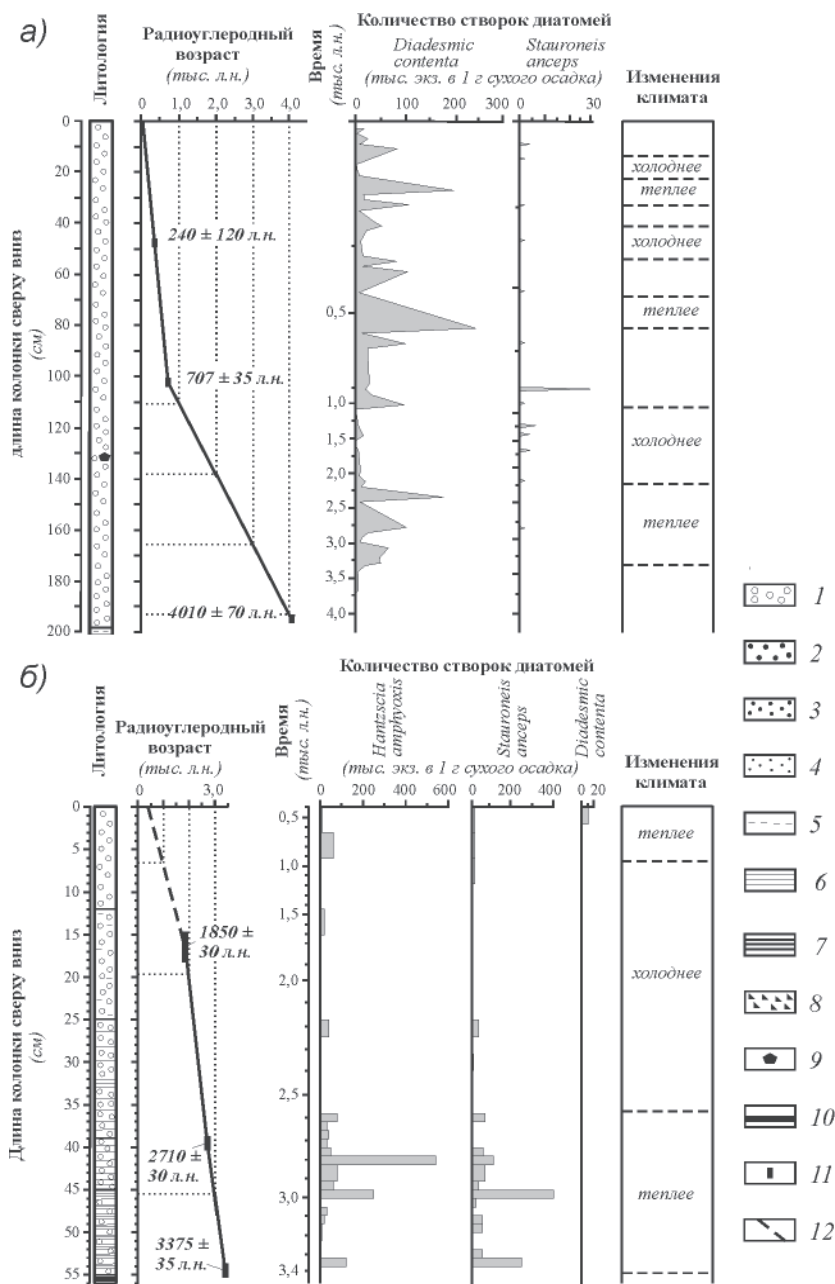


Рис. 2. Литология, распределение значений радиоуглеродных датировок по глубине разреза и результаты диатомового анализа в осадках колонки 1221-5 из озера Зуб (а) и колонки L12 из озера Диатомовое (б).

1 – микробные маты с остатками водорослей; 2 – крупнозернистый песок; 3 – среднезернистый и мелкозернистый песок; 4 – тонкозернистый песок; 5 – супесь; 6 – легкий суглинок; 7 – средний и тяжелый суглинок; 8 – травиные зерна; 9 – обломки пород; 10 – гнейсовая плита; 11 – интервалы отбора осадков для датирования; 12 – интервалы с относительной хронологией осадконакопления.

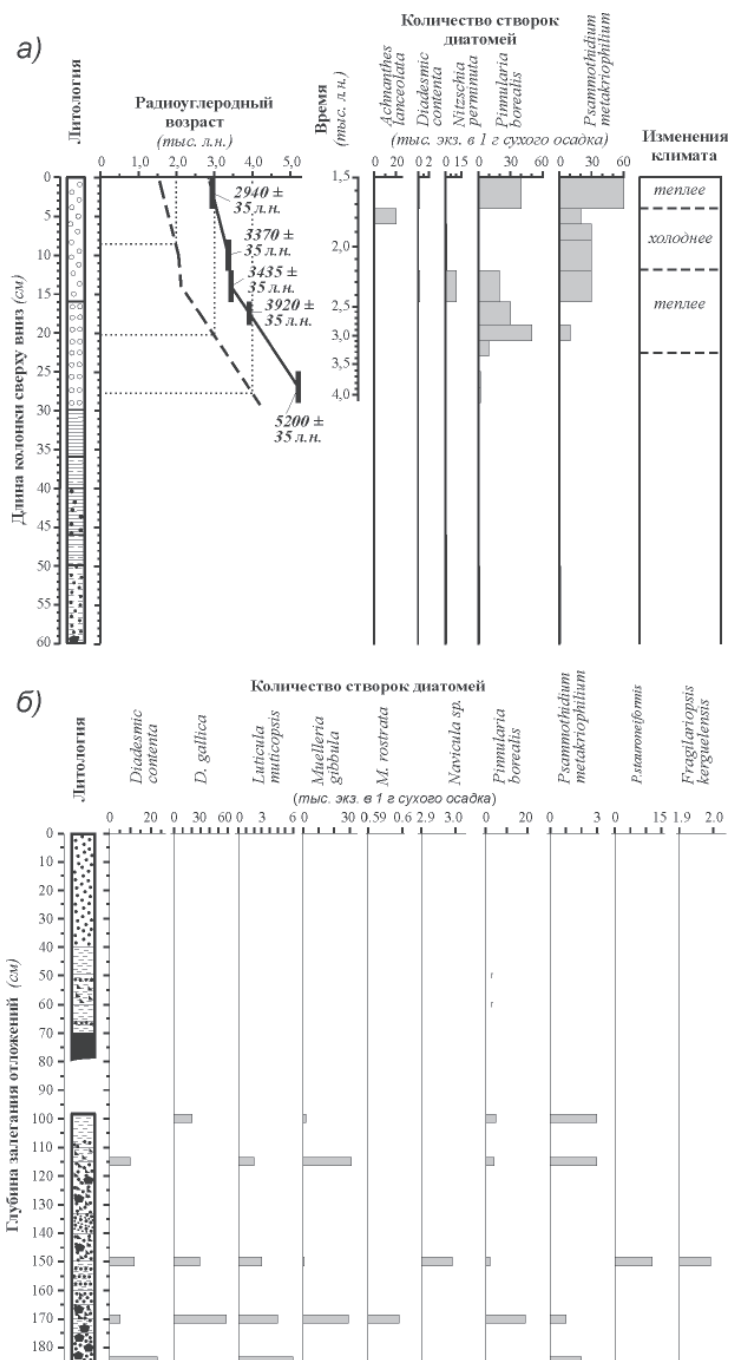


Рис. 3. Литология, распределение значений радиоуглеродных датировок по глубине разреза и результаты диатомового анализа в осадках колонки L7 из озера Круглое (а) и керна отложений из скважины НЛЗ/09 (б).

Условные обозначения по литологии – см. рис. 2.

Таблица 2

Систематический список диатомовых водорослей в современном фитопланктоне (1 – из озера Глубокое [Лавренко, 1966], 2 и 3 – из озер Длинное и Зуб соответственно [Алешинская, Бардин, 1965]), в донных осадках озер и кернах в оазисе Ширмахера

Виды диатомей	Современные			В донных осадках озер						Керны отложений			
	1	2	3	Верхнее	Сбросовое	Зуб	Диатомовое	Розовое	Ожидания	Круглое	НЛ1/09	НЛ3/09	НЛ4/09
Пресноводные													
<i>Achnanthes coarctata</i> (Brébisson) Grunow	+												
<i>A. sp.</i>	+												
<i>Achnantheidium lanceolatum</i> Brébisson ex Kützing										+			
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	+												
<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>placentula</i> Ehrenberg	+												
<i>C. placentula</i> var. <i>euglypta</i> (Ehrenberg) Grunow	+												
<i>C. scutellum</i> var. <i>scutellum</i> Ehrenberg	+												
<i>C. scutellum</i> var. <i>parva</i> (Grunow) Cleve	+												
<i>C. sp.</i>	+												
<i>Cymbella helvetica</i> Kützing	+												
<i>Cymbella prostrata</i> (Berkeley) Cleve	+												
<i>Diadesmic contenta</i> (Grunow ex Van Heurck) D.G. Mann		+	+			+	+			+		+	
<i>Diadesmic gallica</i> W.Smith											+	+	+
<i>D. sp.</i>												+	+
<i>Epithemia sorex</i> Kützing	+												
<i>E. zebra</i> var. <i>porcellus</i> (Kützing) Grunow	+												
<i>E. sp.</i>	+												
<i>Eunotia sp.</i>	+												
<i>Fragilaria virescens</i> Ralfs.	+												
<i>Fragilaria sp.</i>	+												
<i>Hantzschia amphyoaxis</i> (Ehrenberg) Grunow	+		+			+	+	+		+			
<i>Licmophora sp.</i>	+												
<i>Luticula muticopsis</i> (Van Heurck) D.G. Mann	+											+	
<i>Muelleria gibbula</i> (Cleve) S.A.Spaulding & E.F.Stoermer													+
<i>M. rostrata</i> Van de Vijver & Spaulding													+

Виды диатомей	Современные			В донных осадках озер						Керны отложений			
	1	2	3	Верхнее	Сбросовое	Зуб	Диатомовое	Розовое	Ожидания	Круглое	НЛ1/09	НЛ3/09	НЛ4/09
<i>Navicula cryptocephala</i> Kützing	+												
<i>N. sp.</i>	+												
<i>Nupela lapidosa</i> (Krasske) H. Lange-Bertalot	+												
<i>N. Lapidosa</i> var.?	+												
<i>Nitzschia apiculata</i> (Greg.) Grunow	+												
<i>Nitzschia perminuta</i> (Grunow) M. Peragallo										+			
<i>N. spectabilis</i>	+												
<i>Pinnularia borealis</i> Ehrenberg	+	+	+	+		+			+	+	+	+	+
<i>P. sp.</i>	+												
<i>Psammothidium metakryophilum</i> (Lange-Bertalot et Schmidt) Saabe	+			+						+		+	
<i>P. stauroneiformis</i> (Manguin) Bukhtiyarova												+	
<i>Rhoicosphenia curvata</i>	+												
<i>Rhopalodia gibba</i> var. <i>ventricosa</i> (Ehrenberg) Grunow	+												
<i>Sellophora mutata</i> (Krass.) Lange-Bertalot	+												
<i>Stauroneis anceps</i> Ehrenberg	+	+	+	+		+	+	+					+
<i>Staurosirella pinnata</i> var. <i>lancettula</i> (Schumann) Hustedt	+												
<i>Stephanodiscus astraea</i> var. <i>intermedia</i> Fricke	+												
<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kützing	+												
Морские													
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i> (O'Meara) Hustedt						+						+	
<i>Thalassiosira lentiginosa</i> (Janisch) Fryxell						+							
Диадесмиевые (Chlorophyta)													
<i>Cosmarium subtumidum</i> Norst.	+		+		+	+				+		+	+

О возрасте вскрытых вблизи озера Красное отложений можно судить лишь по датировке из керна НЛ4/09, дающей предельное для радиоуглеродного метода значение 50000 л.н. [Абрамов и др., 2011]. Близкое местоположение точек отбора кернов НЛ4/09 и НЛ3/09, сходство их строения позволяют допустить, что накопление отложений керна НЛ3/09 (см. рис. 3) также происходило до оледенения ПЛМ.

Диатомовая флора в донных осадках озер и кернах отложений. В колонках донных осадков из шести озер оазиса Ширмахера (в осадках озер Смирнова и Сбросовое диатомей не найдено) видовое разнообразие диатомовой флоры небольшое: всего было обнаружено 9 видов диатомовых водорослей (Bacillariophyta), из которых 7 пресноводных и 2 морских вида (табл. 2). В колонках из отдельных озер число видов еще меньше (от одного до шести), при этом только 5 видов (*Psammothidium metakryophilum*, *Diadescmic contenta*, *Hantzschia amphyoaxis*, *Pinnularia borealis*, *Stauroneis anceps*) имеют высокие количественные оценки, составляя почти 100 % от общего состава комплексов (см. рис. 2, 3). Все эти виды бентосные. Планктонных видов нет, что связано с отсутствием перемешивания, необходимого для развития кремнистых панцирей диатомей в суспензии в покрытых льдом озерах. В осадках озер Диатомовое, Круглое, Сбросовое, Зуб и Верхнее есть также вид десмидиевых водорослей (Chlorophyta) *Cosmarium subtumidum*.

Содержание диатомовых водорослей в большинстве образцов из осадков водоемов низкое. Максимальное количество створок диатомей содержится в осадках озера Диатомовое (см. рис. 2), примерно в 2,5 раза ниже их концентрация в колонках из озер Зуб и Розовое. В осадках озера Верхнее содержание створок еще меньше, за исключением интервала длиной около 2 см в верхней части колонки.

В отложениях из двух кернов диатомовые водоросли отсутствуют (НЛ2/09) или представлены единичными створками *Diadescmic gallica* (НЛ1/09). В керне НЛ4/09 содержание диатомей крайне мало, однако здесь встречены створки уже четырех видов, а в одном образце обнаружены многочисленные десмидиевые водоросли. Наибольшее видовое разнообразие (при сравнительно низком обилии диатомовых створок) обнаружено в керне НЛ3/09 (9 видов пресноводных диатомей, 1 вид морских диатомей и 1 вид десмидиевых водорослей). В различных интервалах глубин этого керна доминируют пресноводные виды *Diadescmic contenta*, *Diadescmic gallica*, *Muelleria gibbula* (см. рис. 3).

Обнаруженные в донных осадках озер и кернах отложений диатомовые водоросли относятся к числу наиболее распространенных. Они нетребовательны к условиям местообитания и являются среди диатомовой флоры пионерами заселения водоемов. К типичным пресноводным бентосным видам относятся *Diadescmic contenta*, антарктический эндемик *Psammothidium metakryophilum*, к пресноводно-солонатоводным – диатомовые виды *Luticula muticopsis*, *Muelleria gibbula*, *Pinnularia borealis*, *Stauroneis anceps*. По отношению к показателю рН выделяются алкалифилы *Diadescmic contenta* и *Diadescmic gallica*, индифференты – *Pinnularia borealis*, *Stauroneis anceps* [Van Dam et al., 1994]. Виды *Diadescmic contenta*, *Muelleria gibbula*, *Pinnularia borealis*, *Stauroneis anceps* относятся к группе аэрофильных водорослей, которые способны развиваться не только в столбе воды, но и в пересыхающих летом водотоках и указывают на аллохтонный привнос [Schmidt et al., 1990; Spaulding & Stoermer, 1997; Spaulding et al., 1999; Анисимова и др., 2004]. Условия существования водорослей этих сообществ характеризуются прежде всего частой и резкой сменой температуры и влажности. *Hantzschia amphyoaxis* и *Pinnularia borealis*, являясь убиквистами, составляют основу почвенных комплексов диатомей, которые индифферентны в отношении температурного и солевого факторов и поэтому распространены в пресных и солончатых водах и даже в опресненных районах побережья морей [Лавренко, 1966]. Преимущественно неприкрепленные или закрепляющиеся в илестом дне виды (эпипелиты) *Diadescmic*

contenta, *Diadescmic gallica*, *Pinnularia borealis* предпочитают поверхность рыхлых грунтов [Schmidt et al., 1990].

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения оледенения и появление диатомовой флоры. Датировки возраста органики и особенности диатомовых комплексов в осадках озер и кернах отложений указывают на время и условия заселения оазиса Ширмахера диатомовой флорой. Как видно из табл. 2, в нижней половине керна НЛ3/09 обнаружено большое число видов диатомей, многие из которых не найдены в осадках современных озер оазиса. В отложениях керна на глубине 185–200 см установлен диатомовый комплекс, представленный немногочисленными бентосными пресноводными видами, где доминирующему *Diadescmic contenta* сопутствуют *Luticula muticopsis* и *Psammothidium metakryophilum*; на глубине 150–175 см, в обильном комплексе пресноводных бентосных диатомей доминирует *Diadescmic gallica*, в субдоминирующую группу входят *Muelleria gibbula*, *Psammothidium metakryophilum* и др.; в отложениях интервала 100–133 см в диатомовом комплексе доминирует *Muelleria gibbula*, с сопутствующими видами *Diadescmic contenta* и *Pinnularia borealis* (см. рис. 3). Исходя из экологических характеристик этих видов [Cremer et al., 2004; Hodgson et al., 2001; Kellogg et al., 1980; Sabbe et al., 2003; Schmidt et al., 1990; Spaulding, Stoermer, 1997; Spaulding et al., 1999], формирование данных диатомовых комплексов происходило в мелководном пресноводном озерном бассейне со слабощелочной и нейтральной – слабощелочной водой. Судя по возрасту органики из керна НЛ4/09 [Абрамов и др., 2011], такие бассейны существовали в оазисе до ПЛМ, вероятно, во время интерстадиала. Косвенным подтверждением тому служит наличие органического материала возрастом 26000–35000 л.н. в морене и песчано-глинистой толще в основании разрезов осадков озер Глубокое и Зуб [Schwab, 1998].

В верхней части кернов НЛ1/09 – НЛ4/09 диатомей отсутствуют или представлены единичными створками, что отражает похолодание и последующее оледенение. Анализ следов оледенения в оазисе [Бардин, 1966; Втюрин, 1982; Макеев, 1972; Симонов, 1971] показал, что во время ПЛМ его территория перекрывалась тонким малоподвижным покровом льда [Веркулич и др., 2011]. Ледниковые массы подобного типа способны «консервировать» древние рыхлые отложения – возможно, благодаря этому сохранились и отложения кернов.

Повторно диатомовая флора появляется в оазисе в послеледниковое время, в донных осадках современных озер. Самая древняя датировка получена в основании органогенных осадков озера Глубокое (6650±75 л.н. в соответствии с [Schwab, 1998]). Под ними лежит метровая толща песков–супесей, накапливавшихся в начальную, приледниковую фазу развития водоема. В эпিশельфовом озере Круглое возраст подошвы органогенной части осадков составляет около 4000 л.н. (см. рис. 3), однако диатомей есть и ниже по разрезу, в обломочных осадках первой фазы его формирования (возможно, также около 6000–7000 л.н.). Исчезновение диатомовых водорослей в осадках озера между 6000–7000 л.н. (предположительно) и 4000 л.н. могло быть вызвано похолоданием, ростом ледовитости водоема и уменьшением стока талых вод (снижение интенсивности стока отражено уменьшением размерности частиц осадка). Такая смена условий осадконакопления согласуется с характеристикой первых этапов дегляциации оазиса [Веркулич и др., 2011]: раннеголоценовое таяние льда обусловило образование на поверхности оазиса обширных приледниковых озер; снижение уровня ледниковой поверхности на шельфе вело к бурному стоку вод из этих озер к шельфу,

образованию эпишельфовых водоемов и приближению очертаний некоторых озер на поверхности оазиса к современным около 7000 л.н.; примерно между 7000 л.н. и 4000 л.н. дегляциация замедлилась.

Низкое разнообразие бентосных видов, особенности экологических характеристик доминирующих видов (в комплексах заметна роль аэрофильных видов) и преимущественно низкая концентрация створок диатомей в ископаемых диатомовых комплексах голоценовых донных осадков свидетельствуют о суровых условиях обитания диатомовой флоры в водоемах оазиса Ширмахера в послеледниковое время: условия пресноводных, холодноводных, олиготрофных озер со слабощелочной – нейтральной водой, с длительным периодом ледостава. Небольшое число видов диатомей обнаружено и в пробах прибрежных осадков озер Зуб и Длинное (см. табл. 2), что говорит о неблагоприятных современных условиях [Алешинская, Бардин, 1965]. В то же время в бентосе озера Глубокое была обнаружена довольно богатая для подобного водоема флора: многочисленные цисты золотистых водорослей с кремниевой оболочкой, некоторые десмидиевые водоросли, остатки сине-зеленых и зеленых водорослей, диатомей [Лавренко, 1966]. Однако следует отметить, что с 1961 г. на льду озера Глубокое складировались жидкие и твердые отходы со станции Новолазаревская, которые попадали в озеро и заметно меняли его экологию. Даже спустя 15 лет содержание нитратов, хлорофилла *a*, показатели первичной продуктивности фитопланктона в водах этого озера оказались в несколько раз выше, чем в водоемах, не испытывавших антропогенной нагрузки [Каур, 2005].

Перечисленные особенности голоценовой диатомовой флоры, к сожалению, не дают ясного представления о пути повторного заселения оазиса диатомеями. Как указано выше, их первое послеледниковое появление регистрируется в осадках эпишельфового озера Круглое (см. рис. 3). Отметим, что один из трех появившихся видов (*Nitzschia perminuta*) не встречается в осадках других озер и в кернах отложений (см. табл. 2), а *Diadismic contenta* и *Pinnularia borealis* являются пионерами заселения и явно доминируют только в этом эпишельфовом водоеме. Кроме того, по всему разрезу осадков присутствуют обломки морского вида *Thalassiosira sp.* Возможно, данные факты отражают специфичность придонных вод эпишельфовых озер из-за их связи с океаном. Основным путем доставки диатомей на освобождающуюся от оледенения территорию мог быть перенос из других районов ветром или птицами. Однако для раннего голоцена перенос птицами вызывает некоторые сомнения. В оазисе тогда было много ледников, снежников, и шла активная перестройка облика поверхности, т.е. условия для освоения территории птицами были неблагоприятными. В целом отметим, что попадавшая в оазис в раннем голоцене диатомовая флора проходила жесткий отбор и появляющиеся водоемы заселялись лишь видами, для которых возникли приемлемые условия обитания.

Изменения климата, дегляциация и развитие диатомовой флоры в среднем – позднем голоцене. Колебания содержания в колонках доминантных видов диатомей связаны прежде всего с изменениями ледового и температурного режимов водоемов. В осадках озера Зуб, накопившихся между 3300 л.н. и 2200 л.н. (см. рис. 2), содержание створок *Diadismic contenta* довольно велико, что говорит о сравнительно благоприятных условиях вегетации (относительно тепло). В осадках возрастом 2200–1100 л.н. концентрация диатомей резко снижается, отражая увеличение длительности ледостава (похолодание). В последнем тысячелетии растет скорость осадко-

накопления, и высоко среднее содержание створок (в целом благоприятные условия вегетации). Самые резкие изменения количества диатомей, по-видимому, отражают наличие более благоприятных (относительно теплых) условий 550–450 л.н., около 150 л.н. и менее благоприятных (относительно холодных) условий 300–200 л.н. и около 100 л.н.

В колонке из озера Диатомовое створки двух доминирующих видов наиболее многочисленны в осадках возрастом примерно 3400–2600 л.н. (см. рис. 2). Очевидно, вследствие потепления тогда сокращалась продолжительность ледостава и росли летние температуры воды. Между 2600 л.н. и 1000 л.н. условия для развития диатомей явно ухудшились (похолодание): содержание створок резко снижается (до отсутствия). В осадках возрастом примерно 900–500 л.н. наблюдается увеличение концентрации диатомей-доминант, что, возможно, связано с незначительным потеплением.

В эпишельфовом озере Круглое развитие диатомового комплекса в период 3300–2200 л.н. (см. рис. 3) происходило, по-видимому, благодаря уменьшению суровости ледового режима (потепление). В осадках этого возраста встречается до четырех видов диатомей со сравнительно высоким содержанием, с доминированием *Pinnularia borealis* и *Psammothidium metakryophilum*. Минимальное число видов и количество створок (относительное похолодание) отмечено для осадков возрастом 2200–1700 л.н. В верхнем образце колонки концентрация створок растёт.

Несмотря на вероятные погрешности в хронологии осадконакопления, сравнение результатов изучения колонок из озёр позволяет выявить общие сигналы об основных периодах потепления (примерно 3400–2600 л.н.) и похолодания (примерно 2200–1000 л.н.) в районе оазиса. Уверенное построение временной шкалы аккумуляции осадков в озере Зуб и отчетливые вариации содержания в них диатомей указывают также на наличие минимум двух потеплений и двух похолоданий в последнем тысячелетии (см. рис. 2).

Безусловно, потепление 3400–2600 л.н. ускорило дегляциацию оазиса и приближало его ландшафты и озера к современному облику. В северных и центральных районах многие озера, по-видимому, стали питаться тальми водами лишь с небольших, сокращающихся снежников. Например, озеро Диатомовое, в котором последовательно снижается объём минерального материала и достигается максимум створок доминирующих видов *Hantzschia amphyoxis* и *Stauroneis anceps* (см. рис. 2) – признаки уменьшения питания тальми водами и существования благоприятных температурных и ледовых условий. Вероятно, схожим гидрологическим режимом обладало озеро Розовое, где доминируют те же виды и которое сейчас входит в одну группу с озером Диатомовое по гидролого-геохимическим параметрам (см. табл. 1, 2). На юге оазиса некоторые водоемы также преобразились. Судя по смене в озере Зуб терригенных осадков на органические (см. рис. 2), около 4000 л.н. его южный берег перестал быть ледниковым, что привело к уменьшению суровости ледового режима водоема и заселению диатомей. С момента появления здесь почти постоянно доминирует один вид (*Diadesmic contenta*), при этом содержание створок в осадках возрастом 3300–2200 л.н. высоко, но не максимально по разрезу. Вероятно, это говорит об интенсивном ледниковом (через русла) и снежниковом питании водоема, что обуславливало низкие температуры, активную циркуляцию и низкую минерализацию водной толщи – неблагоприятные условия обитания диатомей. Озера Верхнее и Сбросовое, из которых подняты колонки с мощностью органики всего 11–14 см (до супесей с обломками), в это время, скорее всего, не существовали.

Эволюция эпишельфовых водоемов в этот теплый период шла в условиях сокращения снежников на обращенных к морю склонах и снижения уровня моря [Веркулич и др., 2011]. Снижение уровня моря могло вести к ухудшению их связи с океаном и, соответственно, к их опреснению. Максимальное число видов и высокое содержание створок диатомей в осадках озера Круглое (см. рис. 3) указывает на уменьшение мощности ледового покрова водоема, в том числе, вероятно, благодаря сокращению снежников на окружающих его склонах (отепляющий эффект). Появление в осадках створок аэрофильного диатомового вида *Diadescmic contenta* может быть связано с увеличением интенсивности стока талых вод из оазиса. В то же время в нижней части колонки из эпишельфового озера Ожидания (длина колонки 27 см) диатомей не обнаружено. По-видимому, это отражает наличие тогда у озера еще более протяженного ледникового берега, чем сейчас, и, как следствие, суровость его ледового режима. И в настоящее время толщина льда на озере Ожидания больше, чем на озере Круглое.

Похолодание между 2200 л.н. и 1000 л.н. отражено в развитии диатомовой флоры водоемов на поверхности оазиса (озера Зуб и Диатомовое): диатомей развивались здесь в крайне неблагоприятных условиях и даже исчезали (см. рис. 2). Снижение числа видов и количества створок диатомей около 2000 л.н. регистрируется и в осадках эпишельфового озера Круглое (см. рис. 3). В целом три упомянутых водоема продолжали существовать, и в них накапливалась органика, что говорит о незначительном росте снежников или локальных ледников в оазисе. По-видимому, сильнее всего похолодание повлияло на баланс массы южных ледниковых окраин и шельфового ледника, выразившись в приращении их мощности и, возможно, в подвижках краев. На наш взгляд, в это время формировались серии гряд морен на южной ледниковой границе, а также на высотах 5–8 м над уровнем моря на северном склоне оазиса [Веркулич и др., 2011; Bormann, Fritzsche, 1995]. Тогда трудно допустить, что озера Смирнова, Сбросовое и Верхнее появились раньше 1000 л.н.

Сведения об условиях последнего тысячелетия содержатся в осадках озера Зуб. Здесь продолжается доминирование аэрофильного диатомового вида *Diadescmic contenta*, и среднее количество створок выше, чем в предшествующие фазы развития водоема. По-видимому, около 1000 л.н. характеристики озера в целом стали напоминать современные. Короткие интервалы времени роста и снижения содержания диатомей в осадках последнего тысячелетия отражают климатические флуктуации и связанные с ними изменения ледового режима и интенсивности питания озера. Возможно, последнее относительно долгое похолодание (300–200 л.н.) выразилось в формировании моренных гряд на юге оазиса, о молодости которых говорят особенности их морфологии, строения и степени выветренности [Bormann, Fritzsche, 1995].

Судя по малой мощности осадков и бедности диатомовой флоры, образование озера Смирнова, Сбросовое и Верхнее началось позднее 200 л.н., в условиях недавнего отступления ледникового края. Самое молодое из них – озеро Смирнова, имеющее ледниковый берег и суровые ледовые и температурные условия (см. табл. 1). В колонке его осадков длиной 22 см диатомей не обнаружены. В 18-сантиметровой колонке из озера Сбросовое найдены лишь десмидиевые водоросли. В то же время в осадках озера Верхнее (длина колонки 12 см) присутствует несколько видов диатомей и десмидиевые водоросли (см. табл. 2), причем створки *Psammothidium metakryophilum* и *Stauroneis anceps* достигают в верхней части колонки высокой концентрации. На наш взгляд, причинами быстрого развития диатомовой флоры служат: недавнее отделение

бассейна озера от ледника и прекращение интенсивного питания озера ледниковыми водами; небольшие размеры водоема и высокие, частично свободные от снега склоны озерной котловины (отепляющий эффект, быстрый рост минерализации вод).

Сравнение изученных диатомовых комплексов показывает, что, хотя все встречающиеся в осадках виды диатомей довольно близки по условиям обитания, набор видов-доминант в озерах различается. Более того, данные конкретные виды доминируют на всем протяжении развития конкретных водоемов. С одной стороны, это отражает существование в голоцене общих для всех водоемов неблагоприятных условий развития диатомовой флоры (экстремально холодноводных, с длительным ледоставом, с малым количеством питательных веществ). С другой стороны, это указывает на чувствительность видов диатомей к граничным экологическим условиям обитания, создаваемым локальными факторами в ходе эволюции оазиса (время появления водоема, тип его питания, размер, связь с ледником, океаном, морфология бассейна). Способность к быстрой реакции диатомовой флоры даже на кратковременные климатические флуктуации подтверждается резкими колебаниями содержания створок в осадках озера Зуб в последнем тысячелетии.

ВЫВОДЫ

Выполненное исследование донных осадков озер и кернов наземных отложений позволяет заключить:

– в период интерстадиала, перед ПЛМ на поверхности оазиса Ширмахера существовали мелководные пресноводные озера (со слабощелочной водой и нейтральной – слабощелочной водой), в которых развивалась диатомовая флора;

– повторное заселение оазиса диатомовой флорой началось в раннем голоцене (7000–6000 л.н.);

– установленные в голоценовых осадках озер диатомовые комплексы указывают в целом на сходные с современными неблагоприятные условия обитания диатомей в холодноводных, олиготрофных озерах со слабощелочной – нейтральной водой (в комплексах заметна роль аэрофильных видов);

– в периоды относительного потепления (примерно 3400–2600 л.н., 550–450 л.н., около 150 л.н.) в озерах росло количество диатомей без заметного изменения видового состава, а в относительно холодные периоды (примерно 2200–1000 л.н., 300–200 л.н., 100 л.н.) численность диатомей резко снижалась;

– особенности изученной диатомовой флоры озер указывают на чувствительность доминирующих видов диатомей к граничным условиям обитания, создаваемым локальными факторами в ходе эволюции оазиса (время появления водоема, тип его питания, размер, связь с ледником, океаном, морфология бассейна), и к кратковременным климатическим флуктуациям.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 11-04-01247-а и № 12-05-00607-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамов А.А., Слеттен Р.С., Ривкина Е.М., Миронов В.А., Гиличинский Д.А. Геоэкологические условия Антарктиды // Криосфера Земли. 2011. Том XV. № 3. С. 3–19.

Алешинская З.В., Бардин В.И. Диатомовая флора оазиса Ширмахера // Информ. бюл. Сов. антаркт. экспед. 1965. № 54. С. 47–48.

- Анисимова О.В., Романова О.Л., Танченко Е.М.* Атлас водорослей водоемов Звенигородской биологической станции им. С.Н.Скадовского. М.: Изд-во МГУ, 2004. 132 с.
- Бардин В.И.* Горы центральной части Земли Королевы Мод (Восточная Антарктида) // Результаты исслед. по прогр. МГГ Раздел IX-гляциология, № 15. М.: Изд-во АН СССР, 1966. 112 с.
- Быков В.Д., Васильев А.В.* Гидрометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 448 с.
- Веркулич С.Р., Пушина З.В., Сократова И.Н., Татур А.* Изменения оледенения оазиса Ширмахера (Восточная Антарктида) с конца позднего неоплейстоцена // Лед и снег. 2011. №2. С. 116–123.
- Вторин Б.И.* Гляциологические и геокриологические исследования летом 1981–1982 г. в оазисе Ширмахера // Материалы гляциол. исслед. 1982. Вып. 45. С. 108.
- Диатомовый анализ. Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.
- Лавренко Г.Е.* О водорослях одного из озер в районе станции Новолазаревской // Информ. бюл. Сов. антаркт. экспед. 1966. № 56. С. 57–61.
- Лопман А.А., Клоков В.Д.* Формирование стока водоемов оазиса Ширмахера в летний сезон 1983/84 г. // Тр. Сов. антаркт. экспед. 1990. Т. 87. С. 93–105
- Макеев В.М.* Новые данные о рельефе оазиса Ширмахера и истории его развития // Тр. Сов. антаркт. экспед. 1972. Т. 60. С. 48–64.
- Симонов И.М.* Оазисы Восточной Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
- Федорова И.В., Веркулич С.Р., Потанова Т.М., Четверова А.А.* Оценка послеледникового развития озер оазиса Ширмахера (Восточная Антарктида) на основе гидролого-геохимических и палеогеографических исследований // Вклад России в МПГ 2007/2008. Полярная криосфера и воды суши / Под ред. В.М.Котлякова. М.; СПб.: ООО «Паулсен», 2011. С. 242–251.
- Berkman P.A., Forman S.L.* Pre-bomb radiocarbon and the reservoir correction for calcareous marine species in the Southern Ocean // Geophysical Research Letters. 1996. Vol. 23. P. 363–366.
- Bormann P., Fritzsche D.* The Schirmacher Oasis, Queen Maud Land, East Antarctica, and its surroundings. Gotha: Justus Perthes Verlag, 1995. 448 p.
- Cremer H., Gore D., Hultsch N., Melles M., Wagner B.* The diatom flora and limnology of lakes in the Amery Oasis, East Antarctica // Polar Biology. 2004. Vol. 27. P. 513–531.
- Hodgson D.A., Vyverman W., Sabbe K.* Limnology and biology of saline lakes in the Rauer Islands, eastern Antarctica // Antarctic Science. 2001. Vol. 13 (3). P. 255–270.
- Kaup E.* Development of anthropogenic eutrophication in lakes of the Schirmacher Oasis, Antarctica // Verh. Internat. Verein. Limnol. 2005. Vol. 29. P. 678–682.
- Kellogg D.E., Stuiver M., Kellogg T.B., Denton G.H.* Non-marine diatoms from Late Wisconsin perched deltas in Taylor Valley, Antarctica // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 1980. Vol. 30. P. 157–189.
- Palanisamy M.* *Synedra ulna* (Nitzsch) Ehrenberg: A new generic record in Schirmacher Oasis, Antarctica // Current Science. 2007. Vol. 92 (2). P. 179–181.
- Sabbe K., Verleyen E., Hodgson D.A., Vanhoutte K., Vyverman W.* Benthic diatom flora of freshwater and saline lakes in the Larsemann Hills and Rauer Island, East Antarctica // Antarctic Science. 2003. Vol. 15. P. 227–248.
- Schmidt R., Mausbacher R., Muller J.* Holocene diatom flora and stratigraphy from sediment cores of two Antarctic lakes (King George Island) // J. Paleolim. 1990. Vol. 3. P. 55–74.
- Schwab M.J.* Reconstruction of the Late Quaternary climatic and environmental history of the Schirmacher Oasis and the Wohlthat Massif (East Antarctica) // Berichte zur Polarforschung. 1998. Vol. 293. P. 1–128.
- Spaulding S.A., Kociolek J.P., Wong D.* A taxonomic and systematic revision of the genus *Muelleria* (Bacillariophyta) // Phycologia. 1999. Vol. 38. P. 314–341.

Spaulding S.A., Stoermer E.F. Taxonomy and distribution of the genus *Muelleria* Frenguelli // Diatom Research. 1997. Vol. 12. P. 95–113.

Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from Netherlands // Netherlands Journal of aquatic ecology. 1994. Vol. 28 (1). P. 117–133.

S.R.VERKULICH, Z.V.PUSHINA, A.TATUR, D.A.GILICHINSKY, A.A.ABRAMOV, M.MELLES

LATE PLEISTOCENE – HOLOCENE ENVIRONMENTAL CHANGES AND DIATOM FLORA IN THE SCHIRMACHER OASIS (EAST ANTARCTIC)

The obtained results of radiocarbon dating and diatom analysis of bottom sediments from 8 lakes and terrestrial deposits from 4 cores allowed describing environmental changes and diatom flora evolution in the Schirmacher Oasis: the shallow fresh-water lakes with diatom flora had existed in the oasis before Last Glacial Maximum; the time of the oasis territory recolonization by diatom flora is 7000-6000 yrs BP; during Holocene, the living conditions of diatom flora in the oasis lakes were on the whole similar to present ones; development of the diatom flora in different lakes was depended strongly on short-term climatic fluctuations in the region (relative warming 3400–2600, 550–450 and 150 yrs BP; relative cooling 2200–1000, 300–200 and 100 yrs BP) and local factors.

Keywords: Antarctic, Schirmacher Oasis, Late Pleistocene, Holocene, bottom sediments, cores of terrestrial deposits, radiocarbon dating, diatom analysis, paleogeographic reconstruction.