

Т. С. Шелехова, З. И. Слуковский, Н. Б. Лаврова

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР КАРЕЛИИ



Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Институт геологии Карельского научного центра РАН

Т. С. Шелехова, З. И. Слуковский, Н. Б. Лаврова

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР КАРЕЛИИ

Петрозаводск

2020

УДК 551.312:001.891(470.22)
ББК 26.222. 6 (2Рос. Кар)
Ш42

*Эколого-геохимические исследования выполнены при частичной поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проекты № 16-35-00026 и 18-05-00897)*

Рецензент:

В. А. Даувальтер, доктор географических наук, профессор

Шелехова, Татьяна Станиславовна.

Ш42 Методы исследования донных отложений озер Карелии / Т. С. Шелехова,
З. И. Слуковский, Н. Б. Лаврова. – Петрозаводск : Карельский научный центр
РАН, 2020. – 111 с. рис.34, табл.5. Библиогр. 159 назв.
ISBN 978-5-6045871-0-2

В монографии рассмотрены методы изучения донных отложений малых озер Республики Карелия. Показаны возможности эколого-геохимических подходов при палеогеографических реконструкциях и оценке современного состояния водных объектов, что включает в себя также антропогенное воздействие на экосистемы. Дано общее представление о типах озерных отложений, распространенных на территории Карелии, описаны методы полевых исследований озер и их донных отложений и методы их дальнейшего лабораторного изучения. Подробно рассмотрен вопрос о фоновых концентрациях тяжелых металлов и других химических элементов в донных отложениях малых озер южной части Республики Карелия. Приведена краткая информация об изученном фонде сапропеля и диатомита региона исследования в связи с их полезными качествами для народного хозяйства.

Издание представляет интерес для палеолиминологов, геоэкологов, экологов, геохимиков, географов, студентов, магистрантов и аспирантов, занимающихся изучением молодых четвертичных образований, включая донные отложения водных объектов.

УДК 551.312:001.891(470.22)
ББК 26.222. 6 (2Рос. Кар)

ISBN 978-5-6045871-0-2

© Шелехова Т. С., Слуковский З. И., Лаврова Н. Б., 2020
© Карельский научный центр РАН, 2020
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2020
Издательство Буквин

Оглавление

Введение.....	5
<i>Глава 1.</i> Типы донных отложений Карелии.....	7
<i>Глава 2.</i> Методы полевых работ.....	15
2.1. Методы отбора проб и их полевого описания.....	15
2.2. Батиметрическая съемка.....	22
<i>Глава 3.</i> Аналитические методы исследования.....	24
3.1. Физико-химические методы.....	24
3.1.1. Гранулометрический анализ.....	24
3.1.3. Определение редких и рассеянных элементов, включая тяжелые металлы.....	27
3.2. Микропалеонтологические методы.....	31
3.2.1. Спорово-пыльцевой анализ.....	31
3.2.2. Диатомовый анализ.....	51
3.3. Экологическая интерпретация геохимических данных.....	73
3.4. К вопросу о фоновых концентрациях тяжелых металлов в донных отложениях.....	77
<i>Глава 4.</i> Фонд сапропеля Карелии.....	90
Список литературы.....	98

Введение

Озера являются неотъемлемым элементом ландшафта территории Республики Карелия (РК). Всего в регионе насчитывается более 60 тыс. больших и малых озер, на дне которых формируются осадочные органо-минеральные образования, именуемые донными отложениями. Донные отложения малых озер региона сформированы, главным образом, в позднеледниковье и голоцене, около 12 тыс. лет назад в результате физических, химических и биологических процессов и продолжают накапливаться в настоящее время. Обычно они субгоризонтально залегают на дне водоемов, нивелируя первоначальный рельеф котловин.

В озерах Карелии накапливаются минеральные терригенные (глины, алевриты, пески), органогенные (сапропели, диатомиты, торф) и хемогенные (известковая гажка, мергель) отложения. Менее распространены такие осадки, как железная руда и разные виды смешанных донных отложений (песчанистые, диатомовые и известковистые сапропели). Следует также отметить, что распространенность тех или иных типов озерных отложений Карелии в значительной мере дифференцирована. Так, органические сапропели чаще обнаруживаются в озерах южной части региона, а диатомиты – на севере.

Сформированные за длительное время донные отложения являются надежным источником информации о различных событиях прошлого и настоящего. Изменения климата, катастрофические геологические явления, влияние человека на окружающую среду слой за слоем фиксируются в кернах и колонках озерных осадков разных районов мира, включая Карелию. Кроме научного интереса, донные отложения имеют большое практическое значение как источники ценного сырья, используемого в народном хозяйстве. Известно, что начало использования в XVIII веке озерной железной руды – лимонита – послужило причиной возникновения г. Петрозаводска. Человеком издревле использовались озерные глины, например для изготовления посуды или украшений. Сапропели, содержащие большое количество органического вещества, могут быть ценным сельскохозяйственным сырьем, а также использоваться в химической промышленности, в медицине и в природоохранных мероприятиях.

Донные отложения крупных и малых озер Карелии изучались и изучаются в Карельском научном центре и Институте озероведения РАН, в результате чего получен большой объем информации по различным научным направлениям. В настоящий момент уже предложены и детально описаны ряд методик исследования донных осадков разнотипных водных объектов Севера России [Даувальтер, 2012; Субетто, Прыткова

2016]. В Институте геологии КарНЦ РАН комплексные исследования донных отложений озер для различных целей проводятся с 80-х годов XX века. В результате были опубликованы монографии «Донные отложения озер восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита» [Синькевич, Экман, 1995], «Диатомиты Карелии» [Демидов, Шелехова, 2006], а также статьи, посвященные озерным осадкам Карелии [Шелехова, Лаврова, 2011; Слуковский, Даувальтер, 2020; и др.]. Все эти многолетние исследования, включая исследования самые современные, позволили выработать ряд новых методик изучения донных отложений, которые не были подробно описаны ранее.

В данной работе более подробно изложены методики исследования донных отложений позднеледниковья и голоцена, а также современных отложений озер Карелии, которые использовали и используют именно авторы этой монографии. В работе рассматриваются вопросы выполнения полевых работ, методики отбора образцов на различные виды анализов, лабораторная подготовка образцов, интерпретация полученных результатов и даются оценки возможностей каждого из предложенных методов. Авторы не ставили задачу изложить все известные в лимнологии методы и приемы, однако к описанию того, что испробовали в ходе постоянной практики сами, подошли максимально подробно. Стоит отметить, что некоторые методы, предложенные авторами, впервые описываются в российской научной литературе.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН) № АААА-А18-118020690231-1. Кроме того, частично работы проведены при поддержке РФФИ (проекты № 16-35-00026 «мол_а» и 18-05-00897 «а»).

Глава 1. Типы донных отложений Карелии

Минеральные терригенные осадки (глины, алевриты, пески). Терригенные отложения залегают в нижних частях разрезов донных отложений малых озер Карелии. Седиментация минеральных осадков (глин, алевритов, песков) происходила в условиях нестабильной гидрологической обстановки, тающих массивов мертвого льда и незакрепленных растительностью водоразделов. Самые глубоководные терригенные отложения (лимногляциальные отложения) – это ленточные глины. Они формировались в условиях приледниковых водоемов и вскрываются скважинами на дне небольших водоемов (рис. 1), ранее входивших в состав приледниковых, а также местами, например в пределах Шуйской равнины и долины р. Шуи, прослеживаются в обрывах реки (рис. 2). Характеризуются эти отложения чередованием летних (светлых) и зимних (темных) слоев, при подсчете количества которых можно определить время формирования всей осадочной толщи.

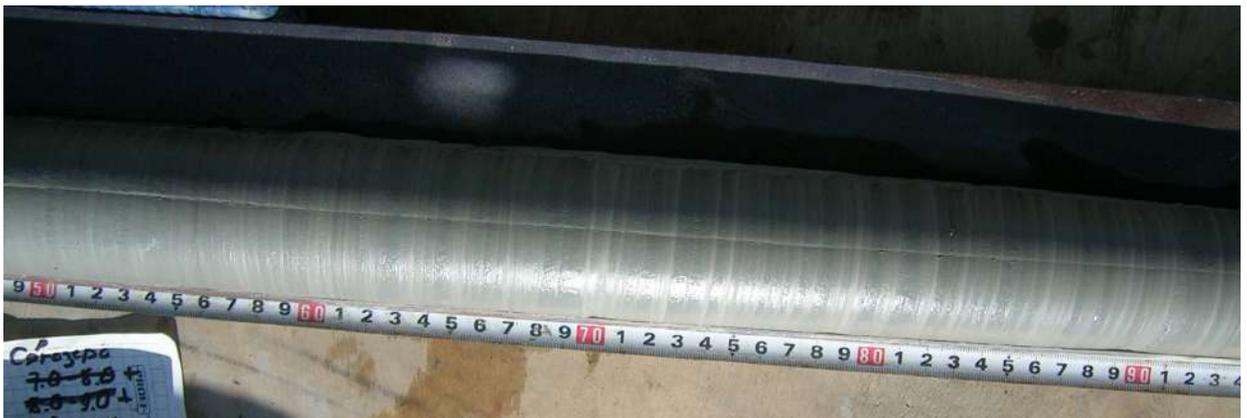


Рис. 1. Часть керна с ленточными глинами в донных отложениях оз. Сяргозеро (Медвежьегорский р-н РК)



Рис. 2. Ленточные глины в обнажении обрыва в долине р. Шуи

Как правило, выше по разрезу такие осадки переходят в однородные глины и алевриты, что свидетельствует о снижении уровня водоема. Выше данные типы отложений в большинстве разрезов сменяются органическими осадками: сапропелями, диатомитами или торфом. Довольно часто нижние части разрезов представлены тонкозернистыми песками с еле заметной слоистостью или разнозернистыми песками, формировавшимися в относительно неглубоких бассейнах. Химический состав различных типов донных отложений Карелии приведен в табл. 1 [Синькевич, Экман, 1995; Демидов, Шелехова, 2006; Шелехова, Лаврова, 2011 и др.].

Таблица 1. Химический состав органических отложений

[по: Демидов, Шелехова, 2001; Слукровский и др., 2017; Слукровский, 2020]

№	Тип осадка	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	ППП	P ₂ O ₅
1	Гажа	1.37	0.02	0.32	0.40	0.03	0.021	1.70	41.2	0.04	0.03	54.6	0.03
2	Сапропель	15.5 2	0.10	1.62	0.13	1.26	0.018	0.61	1.46	0.54	0.42	78.0	0.09
3	Сапропель	47.7	0.21	5.90	0.15	2.61	0.029	0.54	1.73	1.36	0.81	38.8	0.15

		7											
4	Железистый сапропель	2.31	0.09	0.00	31.54	26.2	1.17	0.00	2.45	0.01	0.01	35.8	0.32
5	Диатомит	95.0 2	0.06	2.50	0.13	0.62	0.009	0.34	0.49	0.26	0.27	0.06	0.17
6	Диатомит	61.6 4	0.07	2.66	0.07	1.70	0.012	0.22	0.68	0.58	0.33	31.8	0.1
7	Железистый диатомит	62.3 9	0.09	3.82	19.81	0.01	0.49	0.33	0.38	0.13	0.09	11.7	0.75
8	Сапропель	31.2	0.05	1.32	0.75*		0.01	0.27	0.97	0.06	0.13	64.7 0	0.10
9	Железистый сапропель	20,8	0.05	2.5	41.7*		0.32	0.17	1.2	0.07	0.01	49.6	3.45

Расшифровка: 1 – гажа из малой ламбы, расположенной к северо-востоку от д. Шалговара; сапропели: 2 – ламба у истоков р. Сонга, севернее оз. Селецкое, 3 – ламба у ЮВ берега Ондозера, 4 – железистый сапропель, ламба в нижнем течении р. Семча; диатомиты: 5 – ламба у пос. Волома, 6 – оз. Актеммелиналампи; 7 – железистый диатомит из оз. Роголампи около пос. Муезерский; 8 – органо-силикатный сапропель оз. Грязное (Медвежьегорский р-н), 9 – железистый сапропель оз. Ламба (г. Петрозаводск); * – общее содержание окислов Fe в отложениях без разделения на двух- и трехвалентное железо.

Биогенные озерные отложения (сапропели, диатомиты и торф). Наиболее распространенным типом донных отложений малых озер Карелии являются сапропели (в переводе с греческого – гниющий ил). В международной научной литературе более распространен термин «гиттия» (Gyttja). Сапропели в озерах Карелии могут достигать мощности 9 м. Они представляют собой коллоидную мягкую и жирную массу коричневого, иногда почти черного или оливкового цвета, содержащую в природных условиях 70–90 % воды. В составе органической части сапропелей 40–50 % углерода, 6–7 % водорода, 34–44 % кислорода и до 6 % азота [Яковлев, 1954] (рис. 3).

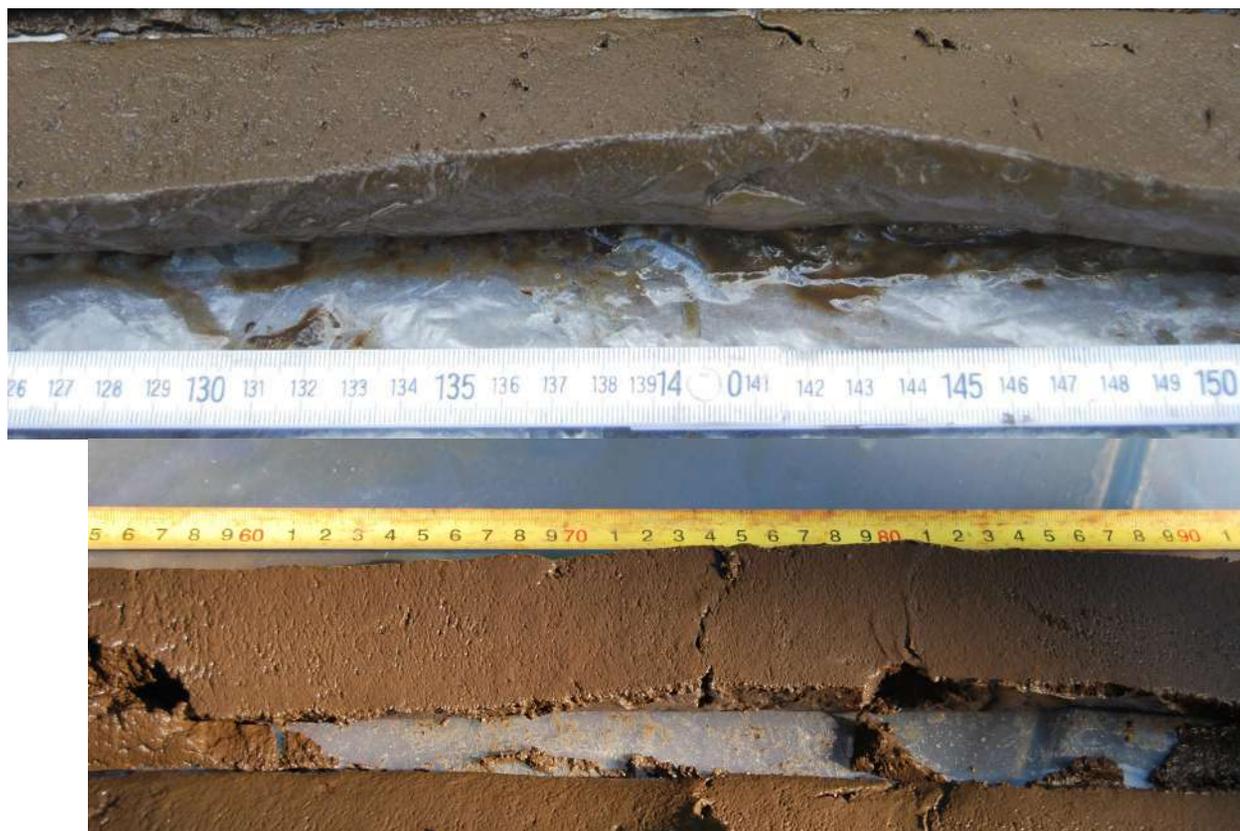


Рис. 3. Сапропели в кернах донных отложений разных озер Карелии

Органическое вещество сапропеля состоит не только из образований самого озера (автохтонное органическое вещество), но и пополняется за счет поступлений с водосборной площади водного объекта. Накопление минеральных веществ происходит за счет выпадения из раствора кристаллических солей под влиянием геохимических процессов и в результате жизнедеятельности водных организмов. Кремнистые створки микроскопических водорослей (диатомей) вместе с растительными остатками образуют диатомовый сапропель, озерная известь – известковистый сапропель, окислы железа – железистый сапропель. В итоге сложных физических, химических и биологических процессов сапропель, помимо основных компонентов, оказывается обогащенным Ca, Fe, N, P, различными микроэлементами (Co, Mn, Cu, Zn и др.) и физиологически активными веществами (каротин, витамины, биостимуляторы, ферменты).

Сапропели являются ценным агрохимическим полезным ископаемым и после соответствующих исследований их химического состава могут использоваться в качестве органического удобрения и мелиоранта почв [Синькевич, Экман, 1995] (табл. 1). Одним из перспективных направлений применения сапропеля и/или сорбционных материалов на его основе является детоксикация разного рода загрязнителей в почвах, почвогрунтах, воде и

других средах, загрязненных тяжелыми металлами и другими экологически опасными веществами [Кирейчева, Хохлова, 2004; Avdeeva, Kovalenko, 2012]. Богатые биологически активными веществами, в том числе двухвалентным железом, сапропели могут использоваться в качестве целебных, бальнеологических грязей, например железистые сапропели оз. Габозеро, используемые в санаториях «Марциальные воды» (Кондопожский р-н РК) и «Белые ключи» (г. Петрозаводск).

К сожалению, до настоящего времени остаются малоизученными сапропели, диатомовые сапропели, диатомиты, имеющие морской генезис и накопившиеся в донных осадках малых остаточных озер на побережье Белого моря, которые также могли бы использоваться в бальнеологических и косметических целях, так как содержат различные микроэлементы.

Менее распространены диатомиты, особенно чистые их разновидности. Диатомиты представляют собой студнеобразную массу и состоят в основном из кремнистых, опаловых створок микроскопических водорослей – диатомей (рис. 4), составляющих от 50 до 90 % веса осадка. Чистый диатомит имеет белый цвет, а в случае примеси органического вещества – коричневатый или зеленоватый. Примеси железа окрашивают его в желтый, оранжевый, красный или вишневый цвета. Сапропелевые диатомиты достигают мощности 8 м и являются ценным полезным ископаемым. Чистые разновидности диатомитов белого цвета выявлены в Муезерском районе Карелии, однако они имеют небольшую мощность (до 1 м).



Рис. 4. Диатомит в керне донных отложений безымянного озера (Муезерский р-н РК)

Озерный торф состоит из неразложившегося органического материала, возникающего в воде из особых ассоциаций гидрофильных растений. Выделяются осоковый, тростниковый, камышовый, гипновый, сапропелевый и другие виды торфов (рис. 5).



Рис. 5. Торф в кернах донных отложений озер Карелии

Ограниченное распространение на территории Карелии имеет гажа. Гажа (известковистый сапропель, озерный мергель) достигает мощности 2 м и состоит из почти сплошных слоев известковых частиц, инкрустировавших остатки сине-зеленых водорослей и перемежающихся с тонкими слоями детрита тех же водорослей [Демидов, Шелехова, 2006]. Этот вид отложений образуется в условиях холодного климата за счет растворов двууглекислого кальция, принесенного в водоем ручьями и источниками, и осажденного на дне в смеси с минеральными и органическими частицами. В гаже встречаются раковины пресноводных моллюсков, иногда образующие самостоятельные прослойки мощностью до 1–2 см (ракуша). Ее находки известны на юге Пудожского района РК, где источником кальция, очевидно, были карбонатные породы каменноугольного периода, а также в районе оз. Паанаярви (Лохский р-н), пос. Пушной (Беломорский р-н) [Синькевич, Экман, 1995] и д. Шалговаара (Медвежьегорский р-н). Источниками кальция для них были карбонатные ятулийские породы Паанаярви-Куолоярвинской, Лехтинской и Сегозерской структур соответственно. Гажа (рис. 6) является ценным агротехническим сырьем и широко используется для раскисления подзолистых почв. Однако вследствие ограниченного распространения ее использование в качестве полезного ископаемого на территории Карелии весьма проблематично.



Рис. 6. Гажа из малой ламбы, расположенной к северо-востоку от д. Шалговаара

Озерная железная руда представляет собой скопление бурого железняка – лимонита в виде шариков, лепешек, монет (рис. 7). Встречается в рассеянном состоянии в песках, сапропелях и других донных осадках. Ее отложение связано с широко распространенным почвенным подзолообразовательным процессом, во время которого вымываемые из почв железо и алюминий поступают в озеро в виде бикарбоната закиси железа, сульфата окиси железа, сульфидов закиси и окиси железа с органическими кислотами и в форме гидрозоля окиси железа и алюминия.



Рис. 7. Озерная руда

В озерной воде под действием грибов, бактерий и низших водорослей происходит распад бикарбонатов, выпадение нерастворимой гидроокиси железа и коагуляция гидрозолей в гели, а из сульфатов и сульфидов железа выделяется гидрат окиси железа.

При этих процессах отлагается озерная руда – лимонит ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) с примесью фосфора, марганца и минеральных зерен.

Озерные руды в Карелии распространены весьма широко и с начала XVIII века использовались в металлургической промышленности, благодаря которой возник г. Петрозаводск.

Глава 2. Методы полевых работ

2.1. Методы отбора проб и их полевого описания

В Карелии при бурении и отборе проб донных отложений озер применяются ручные пробоотборники. Главное условие: отбор проб из центральной части озера, в зоне аккумуляции, где образуются наиболее представительные по мощности слои донных отложений, наиболее полно отражающие историю развития озера. Однако в случае исследования самых глубоких слоев донных отложений позднеледниковья и голоцена бурение допустимо производить со сплавины в прибрежной части водоема (рис. 8). Керны таких озерных осадков хорошо отбирать при помощи ручного торфяного бура (русский бур), состоящего из метровых металлических штанг, ручки и основной (захватывающей) части бура. Все составляющие буровой конструкции крепятся между собой перед работой при помощи металлических шкантов.



Рис. 8. Отбор керна донных отложений безымянного озера в Суоярвском р-не РК при помощи русского бура со сплавины (слева З. И. Слукровский, справа А. С. Медведев), фото Т. С. Шелеховой

Бурение осуществляется вручную посредством давления на ручку бура сверху вниз одним или двумя людьми. При опускании прибора в грунт захватывающая часть бура должна быть открытой для возможности попадания в нее осадка с нужной глубины. После достижения нужных горизонтов донных отложений ручку бура следует повернуть по часовой стрелке на 180° . После этого конструкцию необходимо также вручную поднять наверх, отсоединяя последовательно скрепленные шкантами штанги.

Документация керна оформляется непосредственно в полевых условиях. Выполняется тщательное описание колонки донных отложений с фиксированием литологии осадков, цвета, плотности, наличия каких-либо текстурных особенностей (слоистость, признаки перемешивания, стратиграфические несогласия) и т. д. Для проверки правильности полевых описаний желательно, чтобы керн был сфотографирован (рис. 9). После этого следует отобрать образцы непосредственно в полевых условиях или упаковать их в пластиковые трубки и отправить в лабораторию для дальнейшего изучения. В зависимости от литологического состава отдельных слоев частота взятия образцов может быть различной, что определяется тонкостью материала, слагающего породу, и мощностью осадков.



Рис. 9. Керн донных отложений, отобранных ручным пробоотборником (фото Т. С. Шелеховой)

Для наиболее полной характеристики отбор проб из скважины осуществляется послойно, с интервалом 5–10 см, поверхностные осадки желательно исследовать каждые 1–2 см. Однако в последнее время наметилась тенденция подробного послойного изучения кернов с частотой 2 см, что, конечно же, позволяет произвести более детальные исследования. Отбор проб на спорово-пыльцевой и диатомовый анализ необходимо осуществлять с максимальной осторожностью (конкретные рекомендации приведены в разделе 3.2.1), чтобы гарантировать их чистоту, тщательно документировать образцы, отмечать их положение в литологической колонке.

Отбор проб самых современных слоев донных отложений малых озер Карелии хорошо проводить при помощи пробоотборника Limnos (Финляндия), который позволяет отбирать колонку осадков высотой до 60 см (рис. 10). Основная, то есть захватывающая, часть прибора состоит из пластиковых колец высотой 1 см и диаметром 9.5 см, которые соединены в единую трубообразную конструкцию при помощи двух стержней из нержавеющей стали. Внешняя конструкция Limnos'а, как и стержни, также изготовлена из нержавеющей стали. Для утяжеления общего веса прибора, что необходимо для

максимально возможного погружения прибора в толщу донных отложений, используются свинцовые грузы, которые прикрепляются к внешнему каркасу Limnos'a или непосредственно к сомкнутым в трубу пластиковым кольцам



Рис. 10. Пробоотборник Limnos с колонкой донных отложений (Лоухский р-н РК, 2019), фото А. С. Мицукова

Прибор вручную опускается на дно озера в вертикальном положении на веревке, которая крепится к внешнему каркасу Limnos'a при помощи карабина (рис. 11). Рекомендуется погружать пробоотборник плавно, без рывков, чтобы закрывающий механизм не сработал преждевременно. Однако если достоверно известна глубина водоема в месте, где производится отбор проб донных отложений, то за 1.5–3 м до дна можно ослабить хват веревки, чтобы ускорить погружение пробоотборника и тем самым усилить давление на изучаемые осадки. После отбора колонки донных отложений прибор поднимается наверх и доставляется к планируемому месту разбора колонки.

Разбор осуществляется непосредственно на водоеме или возле него, так как транспортировка Limnos'a с колонкой отложений на дальние расстояния крайне нежелательна – осадки могут разболтаться и расплескаться вследствие тряски. В этой связи наиболее удобно производить отбор проб донных отложений при помощи Limnos'a со льда водоема в весенне-зимний период (с середины марта по конец апреля). В этом случае разбор колонки можно осуществлять прямо у полыньи. Если работа осуществляется летом или осенью при помощи лодки, то плавсредство необходимо заякорить с двух сторон, чтобы его не сносило ветром и прибор погружался вертикально.

Желательно не проводить работы по отбору проб донных отложений с использованием Limnos'a во время сильного ветра.

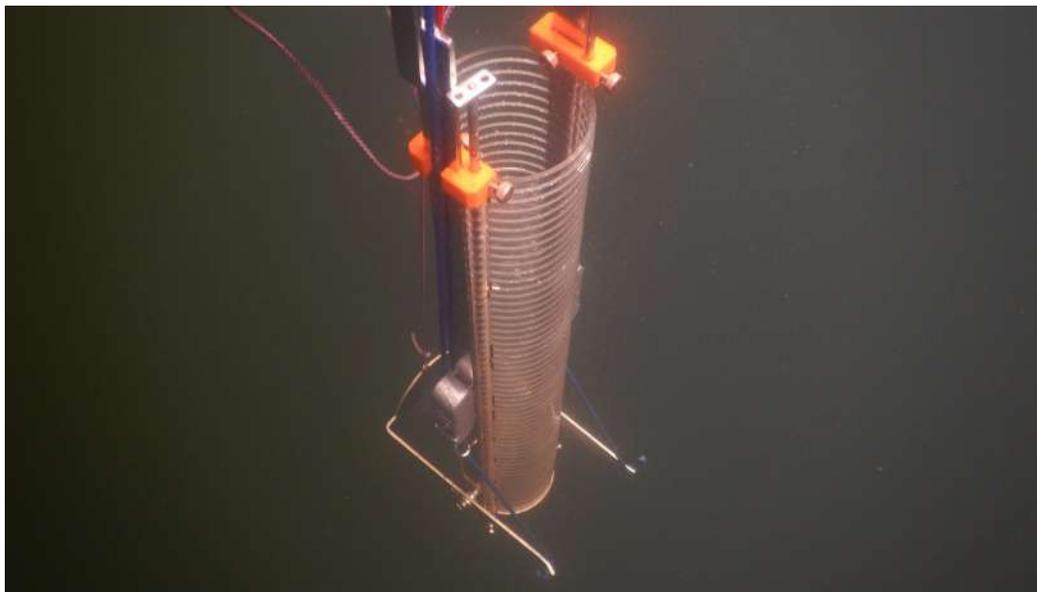


Рис. 11. Пробоотборник Limnos, погруженный в воду (фото З. И. Слуковского)

Разбор колонки донных отложений, отобранной Limnos'ом, заключается в последовательном срезании слоев озерных осадков сверху вниз по колонке при помощи одного или нескольких колец (рис. 12). Осуществляется это благодаря снятию одного из стержней, которыми скреплены кольца. Оставшийся стержень не позволяет кольцам рассыпаться и не теряться отобранному осадку при срезании слоев. Обычно в этой работе заняты 3–4 человека. Не рекомендуется производить разбор колонок в одиночку. Учитывая, что высота одного кольца составляет 1 см, то колонку можно разбирать на слои любой толщины, кратной единице. Обычно для детального анализа распределения валовых концентраций химических элементов, оценки средней скорости седиментации и диатомового анализа колонки донных отложений, отобранные при помощи Limnos'a, делятся на слои толщиной 1–2 см. Для оценки концентраций главных элементов, содержания органического вещества, распределения гранулометрических фракций и анализа форм нахождения тяжелых металлов колонки можно разделять на более толстые слои – от 2 до 10 см в зависимости от целей и задач конкретного исследования.

При разборе колонки донных отложений пробы упаковываются в пластиковые контейнеры с плотно закрывающейся крышкой или в грипперы (полиэтиленовые пакеты, герметично закрывающиеся с помощью особой застежки). Во время работы желательно также использовать пластиковую ложку или совок и другие приспособления, также

изготовленные из пластмассы. После разбора все пробы следует упаковать в сумку-холодильник с хладоэлементами с последующей доставкой в лабораторию. Во время длительных полевых работ контейнеры с пробами желательно перекладывать в обычный холодильник и держать там до конца экспедиции, либо периодически менять хладоэлементы из сумки-холодильника. Если нет ни той, ни другой возможности, то пробы следует держать в темном прохладном месте.



Рис. 12. Процесс разбора колонки донных отложений, отобранной Limnos'ом (г. Мурманск, оз. Окуневое, 2019), фото А. В. Гузевой

Сразу после отбора проб и разбора колонок донных отложений необходимо непосредственно в поле внести следующую информацию в полевой дневник (рис. 13): дата и время работ, географические координаты точки отбора отложений, глубина озера в месте отбора, прозрачность воды, измеренная при помощи диска Секки, цвет, консистенция и запах (если есть) отобранных осадков, высота (мощность) отобранной колонки, частота отбора проб, виды анализов, на которые пойдут пробы донных отложений. В случае наличия у исследователей каких-либо портативных измерительных приборов (мутномер, рН-метр, Eh-метр, термодатчик и т. д.), то полученные с их помощью данные следует также записать в полевой дневник до возвращения в лабораторию или к месту экспедиционного базирования. Кроме того, желательно сделать общее описание исследуемого водного объекта. Например, стоит указать его размеры, тип берегов, наличие или отсутствие какой-либо растительности, близость к населенным пунктам, автомобильным дорогам или железнодорожным путям, близость к возможным

источникам антропогенного загрязнения и т. д. Исследователю стоит помнить, что любая записанная мелочь может в дальнейшем пригодиться при интерпретации аналитических данных по изучаемым озерным донным отложениям.



Рис. 13. З. И. Слуковский за заполнением полевого дневника (Лоухский р-н РК), фото А. С. Мищукова

Пример описания колонки донных отложений безымянного озера в районе п. Лендеры Муезерского района РК (абс. отм. уреза воды озера 180,4 м; координаты: $63^{\circ} 26' 51''$ с. ш.; $31^{\circ} 13' 45''$ в. д.).

Разрез представлен следующей стратиграфической последовательностью (снизу вверх, рис. 14):

- 390–377 см – тонкозернистый песок серого цвета (по литологии близок к алевроитам) с еле заметной тонкой слоистостью. На гл. 387–386 см – прослойка мелкозернистого песка с органикой, более темный по цвету. Контакт с вышележащим горизонтом ровный, четкий, отличается по цвету и составу.
- 377–362 см – зеленовато-коричневый гомогенный сапропель, сменяющийся с гл. 372 см зеленовато-серым по цвету сапропелем, контакт с вышележащим слоем ровный, четкий, отличается по цвету.
- 362–347 см – сапропель черного цвета, гомогенный, с гл. 357–351 см темно-коричневого цвета с растительными остатками, выше (351–347 см) без растительных остатков, гомогенный.

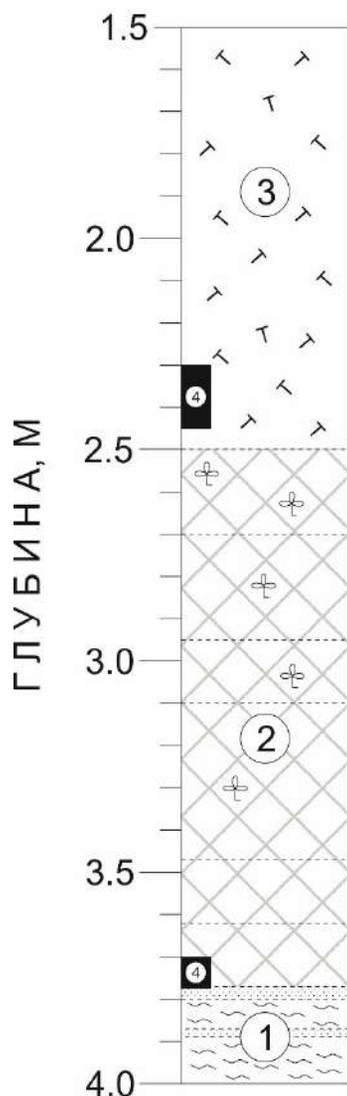


Рис. 14. Стратиграфическое строение разреза донных отложений безымянного озера в районе п. Лендеры (Муезерский р-н РК):

1 – тонкозернистый песок с прослойком мелкозернистого; 2 – сапрпель с растительными остатками; 3 – торф; 4 – образцы, отбираемые на радиоуглеродный анализ

- 347–342 см – однородный гомогенный темно-коричневый сапрпель с едва заметной слоистостью, отличается от вышележащего по четкому контакту.
- 342–250 см – предположительно, диатомовый сапрпель или диатомит. На гл. 342–340 см – тонкий прослойк, возможно, диатомита, светло-серого, почти белого цвета. Выше по разрезу темно-серые, почти черного цвета диатомовые сапрпели сменяются зеленовато-коричневыми и оливковыми, а затем, на глубине 310–295 см, светло-коричневыми, на вышележащем контакте почти черными. На глубине 295–292 см – тонкий прослойк (3 см) с волосовидными растительными остатками, выше – светло-

коричневый сапропель. Количество неразложившихся остатков выше по разрезу возрастает.

- 250–150 см – торф, в верхней части разжиженный.

Следует отметить, что с глубины 150–100 см донных отложений керн поднять не удалось из-за сильного обводнения.

2.2. Батиметрическая съемка

Одним из важнейших параметров любого озера является его глубина. Согласно рекомендациям ученых-палеолимнологов, отбор кернов и колонок донных отложений малых озер лучше всего производить в районах максимальной глубины [Даувальтер, 2012]. В этой связи перед отбором проб важно изучить батиметрические особенности озера, выбранного для исследования донных отложений. Для этой цели хорошо подходит эхолот-картплоттер Garmin Echomap Plus 42cv. Количество профилей, которые необходимо пройти на лодке во время батиметрической съемки, выбирается исходя из площади озер и его формы. При наличии мотора при скорости 6–10 км/ч в среднем такая работа занимает не более двух часов (рис. 15).

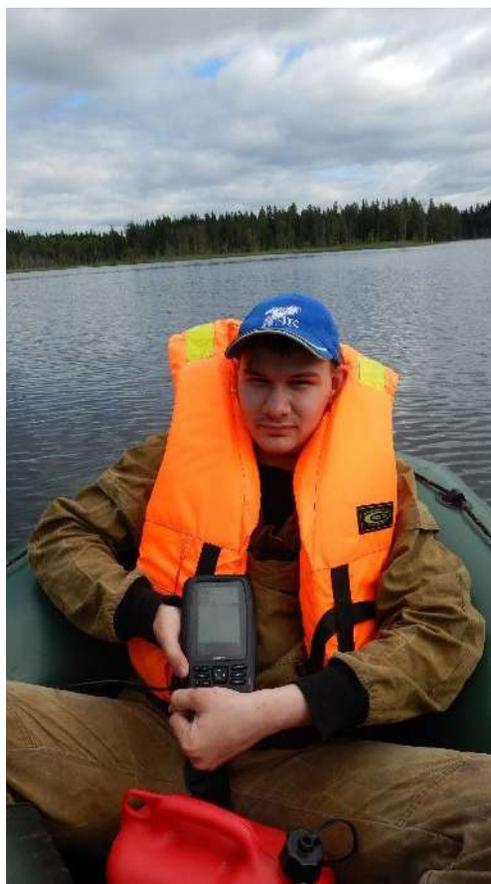


Рис. 15. Студент Е. В. Сыроежко с эхолотом-картплоттером Garmin Echomap Plus 42cv во время батиметрической съемки (Лахденпохский р-н РК), фото З. И. Слуковского

Также во время батиметрической съемки можно отметить точку с наибольшей глубиной озера, чтобы еще до построения карты распределения глубин отобрать пробы донных отложений с наиболее подходящего места. В дальнейшем данные, полученные в ходе эхолотирования, обрабатываются в программе Microsoft Excel, а сами карты (рис. 16) строятся при помощи программы Golden Software Surfer 13. Следует отметить, что батиметрическая съемка позволяет не только провести детальное исследование глубин озера, но и установить в онлайн-режиме факт наличия в водоеме рыбы или большого количества макрофитов на дне. Кроме того, эхолотирование позволяет выявить опасные предметы, захороненные в озере, к их числу можно отнести затонувшую технику, в том числе автомобили, и крупные стволы деревьев.

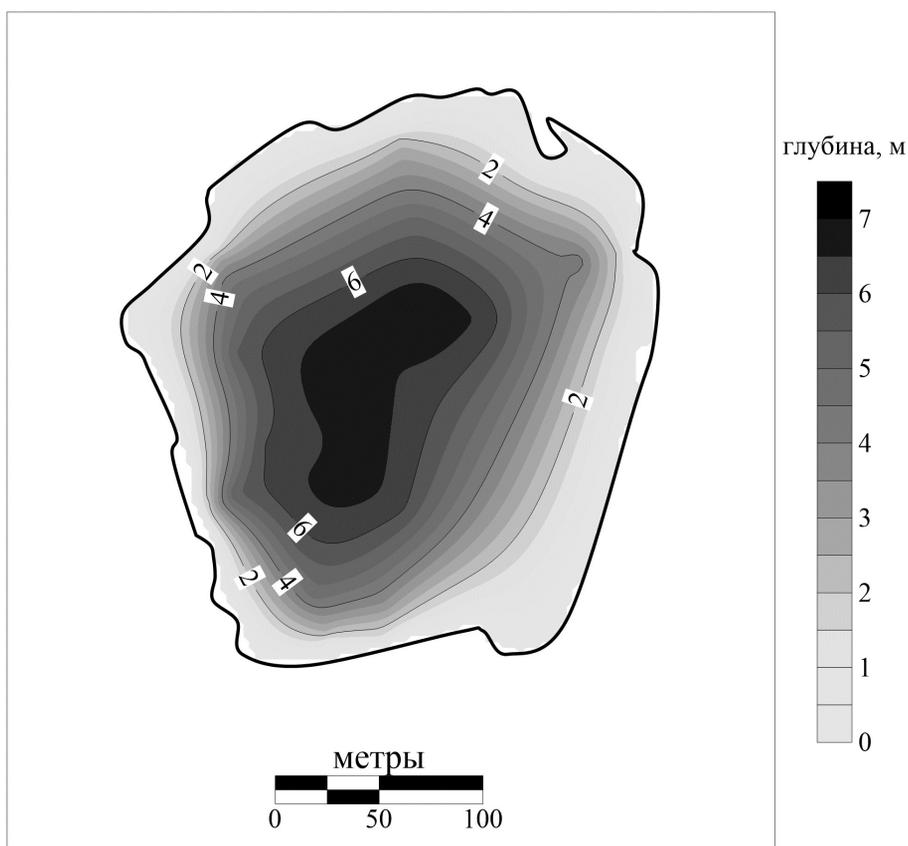


Рис. 16. Карта глубин оз. Лиункунлампи (Лахденпохский р-н РК), автор Е. В. Сыроежко

Глава 3. Аналитические методы исследования

3.1. Физико-химические методы

3.1.1. Гранулометрический анализ

С развитием аналитического оборудования в последние десятилетия стало возможным уйти от классических методов (ситовой, пипеточный, ареометрический и др.), применяющихся для оценки гранулометрического состава четвертичных отложений, почв и донных осадков водных объектов. Сегодня существует возможность делать это при помощи современной приборной базы. Например, при помощи многофункционального анализатора частиц серии LS13 320 (Beckman Coulter, США). Определение размера частиц донных отложений на этом анализаторе выполняется методом лазерной дифрактометрии в воде на основе использования физического принципа рассеяния электромагнитных волн различной длины.

Технические особенности прибора позволяют анализировать частицы размером от 0.04 мкм до 2.0 мм в соответствии со стандартом ISO 13320-1. В связи с тем, что точность определения гранулометрического состава непосредственно зависит от подготовки материала к анализу, выделение навесок включало тщательное усреднение материала методом квартования (с применением желобкового делителя Джонса). Кроме того, чтобы исключить погрешности измерений из-за процесса коагуляции (слипания мелких зерен), все образцы дополнительно обрабатываются ультразвуковыми волнами. Следует также добавить, что для анализа отобранных проб донных отложений лучше использовать образцы с естественным содержанием влаги, то есть до анализа желательнее не подвергать отобранные пробы озерных отложений сушке, храня их в лабораторном холодильнике. Обработка конечных результатов легко осуществляется при помощи программы Microsoft Excel 2007. Благодаря тому, что анализ гранулометрического состава, осуществляемый с использованием анализатора частиц серии LS13 320, менее трудоемок по сравнению с классическими методами оценки размеров частиц донных отложений [Di Stefano et al., 2010; Здобин, Семенова, 2011], то это заметно ускоряет получение необходимых результатов. За один день инженер может обработать 20–40 образцов проб озерных отложений.

В настоящий момент существует большое количество различных классификаций осадочных образований, основанных на гранулометрическом анализе. Чаще всего выделяются грубообломочные (>1–2 мм), песчаные или псаммитовые (0.05–1–2 мм), алевритовые или пылеватые (0.005–0.05 мм) и глинистые или пелитовые (<0.005 мм) фракции [Рухин, 1956; Логвиненко, 1974]. Такое разделение на гранулометрические

фракции успешно применяется в палеолимнологии [Субетто, 2009]. Для смешанных озерных отложений предлагается более сложная классификация (табл. 2).

Таблица. 2. Гранулометрическая классификация смешанных осадков

[Субетто, 2009]

Тип осадка	Наименование осадка	Содержание фракций, %		
		2.00–0.05 мм	0.05–0.005 мм	<0.005 мм
Пелитовый	Пелит (глина)	0–30	0–30	>70
	Алевропелит	0–25	15–30	50–70
	Песчаный пелит	15–30	0–25	50–70
Алевритовый	Алеврит	0–30	>70	0–30
	Глинистый алеврит	0–25	50–70	15–50
	Песчаный алеврит	15–50	50–70	0–25
Песчаный	Песок	>70	0–30	0–30
	Алевритовый песок	50–70	15–50	0–25
	Глинистый песок	50–70	0–25	15–50
Смешанный	Песок алеврито-глинистый	33–50	0–50	0–50
	Алеврит песчано-глинистый	0–50	33–50	0–50
	Пелит песчано-алевритовый	0–50	0–50	33–50

Однако при изучении донных отложений с высоким содержанием органического вещества и низким количеством кремнезема и глинозема (органоминеральные или органические сапропели) следует с большой осторожностью применять термины «песок» или «алеврит», даже если в этих отложениях фиксируется большое количество аналогичных гранулометрических фракций. Дело в том, что органические частицы озерных осадков могут иметь размеры до 2 мм. Более того, частицы органических донных отложений малых озер размером от 0.05 до 1 мм могут преобладать в исследуемых осадках, что, однако, не дает основания называть такие осадочные образования «песчаными» или «алевритовыми». Вероятно, при изучении сапропелевых отложений Карелии лучше всего оперировать исключительно числовым обозначением гранулометрических фракций.

3.1.2. Определение главных элементов и потерь при прокаливании

Изучение химического состава – одна из важнейших составляющих при исследовании донных отложений малых озер. В первую очередь проводится определение так называемых главных элементов, к числу которых относятся Si, Al, Fe, Na, Ca, K, Mn, Ti, P

и S. Эти элементы выделяются в отдельную группу, потому что они входят в состав любых геологических образований, к которым относятся и такие современные образования, как донные отложения озер. Вместе с H, C, Cl, P, N, F и Ba они составляют 99.8 % массы земной коры. При изучении геологических объектов, включая озерные осадки, главные элементы играют важную классификационную роль. Обычно анализ концентраций окислов главных элементов – это первый шаг к анализу генезиса донных отложений и к пониманию о возможном антропогенном влиянии на озерные экосистемы.

Содержание указанных главных элементов хорошо проводить при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL ADVANT'X (ThermoFisher Scientific, США). Метод рентгенофлуоресцентного анализа основан на сборе и последующем анализе спектра, возникающего при облучении исследуемого материала (в нашем случае образцов донных отложений) рентгеновским излучением. Перед РФА-анализом образцы донных отложений следует просушить в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С до постоянного веса изучаемых образцов. Далее пробы необходимо истереть до порошкообразного состояния на лабораторном стирателе или в ступке при помощи пестика.

К непосредственному анализу образцы приготавливаются методом сплавления с флюсом. Флюс представляет собой смесь 66.7 % лития тетраборнокислого (хч ТУ6-09-04-253-86) и 33.3 % лития метаборнокислого (хч ТУ 6-09-4756-79). Вместе с анализируемыми образцами производится сплавление одного стандартного образца. Предварительно образцы массой 2 г прокаливаются в керамических тиглях при 1000 °С в муфельной печи в течение 30 минут. Прокаленные образцы массой 1 г смешиваются с флюсом массой 9 г, в смесь добавляется 25%-й водный раствор LiBr (Lithium bromide, 99 %, pure, anhydrous, Acros Organics). Полученная смесь сплавляется в золотоплатиновом тигле до получения однородного расплава. Расплав выливается в золотоплатиновую изложницу и охлаждается до комнатной температуры.

Учитывая, что значительную массу озерных донных отложений обычно составляет органическое вещество, его содержание также крайне важно при их изучении. Анализ потерь при прокаливании (ППП или LOI (loss on ignition)), которые характеризуют содержание органического вещества в донных отложениях (органические соединения выгорают обычно в диапазоне температуры от 100 до 500 °С), проводится весовым способом после прокаливания образцов при температуре 500 °С в муфельной печи. Контроль качества анализа ППП можно осуществлять при помощи синхронного термического анализа (рис. 17).

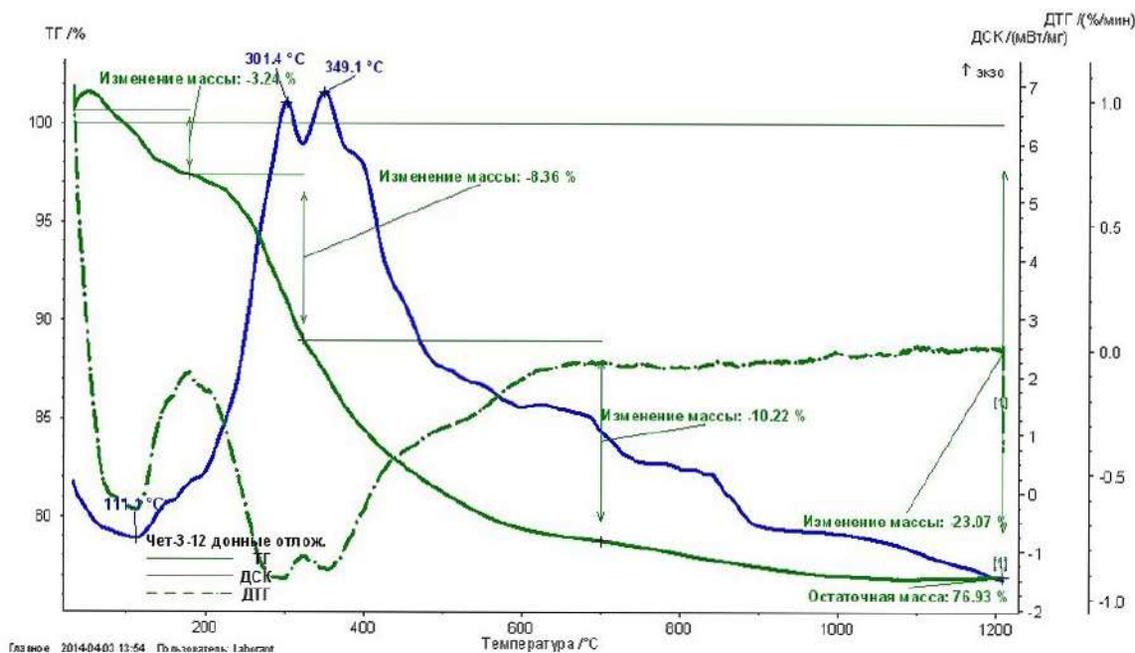


Рис. 17. Термограмма образца донных отложений оз. Четырехверстное (г. Петрозаводск), выполненная при помощи термоанализатора NETZSCH STA 449F1 (ИГ КарНЦ РАН)

3.1.3. Определение редких и рассеянных элементов, включая тяжелые металлы

Общеизвестно, что малые редкие и рассеянные элементы озерных отложений могут служить чуткими индикаторами геохимических условий в водной среде, поскольку изменяют свое фазовое состояние в соответствии с динамикой механической, биологической и физико-химической преобразованности осаждающегося в водоемах материала. Причем оценка концентраций редких и рассеянных элементов в донных отложениях может позволить выявить доминирование как природных, так и антропогенных факторов, влияющих на озеро. В случае с оценкой антропогенного влияния среди редких и рассеянных элементов важно выделять группу тяжелых металлов (heavy metals), элементов, которые поступают в окружающую среду в результате деятельности промышленных предприятий и транспорта и проявляют ярко выраженные токсические свойства по отношению к живым организмам. На сегодняшний день к тяжелым металлам относят такие элементы, как Pb, Cd, As, Hg, Tl, W, V, Cu, Zn, Sb, Cr, Ni, Sn, Co, Mo, Mn и Bi. Почти все из них можно определить при помощи масс-спектрометрии – современного метода, повсеместно используемого в настоящее время при изучении донных отложений озер.

В наших работах содержание редких и рассеянных элементов (Li, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, W, Tl, Pb, Bi, Th, U) в пробах донных отложений обычно

определяется масс-спектральным методом на приборе XSeries-2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific, США). Основой для масс-спектрального измерения служит ионизация компонентов, позволяющая физически различать компоненты на основе характеризующего их отношения массы к заряду; измерение интенсивности ионного тока позволяет производить отдельный подсчет доли каждого из компонентов (получать масс-спектр вещества). Подготовка к анализу обычно заключается в просушивании проб донных отложений в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С до постоянного веса изучаемых образцов и истирании до порошкообразного состояния на лабораторном истирателе или в ступке при помощи пестика.

Для оценки валового содержания редких и рассеянных элементов разложение образцов донных отложений проводится путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа используются аналитические навески образцов массой 0.1 г. Образцы помещаются в тефлоновые стаканы (объем 50 мл), к ним добавляется 0.1 мл раствора, содержащего 8 ppb 161 Ду (контроль химического выхода при проведении процедуры разложения образцов), смачивается несколькими каплями деионизованной воды. Затем добавляется 0.5 мл HClO_4 (Perchloric acid fuming 70% Supratur, Merck), 3 мл HF (ОСЧ ТУ 6-09-3401-88), 0.5 мл HNO_3 (ОСЧ ГОСТ 11125-84) и выпаривается до появления интенсивных белых паров. Кислоты HF , HNO_3 , HCl подвергаются дополнительной очистке в перегонном аппарате PTFE/PFA SubboilingEco IR. Стаканы охлаждаются, их стенки обмываются водой, и раствор снова упаривается до влажных солей. Затем добавляется 2 мл HCl (ОСЧ ГОСТ 14261-77) и 0.2 мл 0.1М раствора H_3BO_3 (ч.д.а.) и упаривается до объема 0.5–0.7 мл. Полученные растворы переносятся в полиэтиленовые бюксы, разбавляются деионизованной водой до 20 мл. Для съемки используются разбавленные в 20 раз основные растворы. В качестве холостых проб в тефлоновых стаканах проводятся описанные выше процедуры без образцов. Кроме того, вместе с анализируемыми образцами проводятся разложения холостых проб и одного стандартного (контрольного) образца (химический состав донного ила озера Байкал БИЛ-1 – ГСО 7126-94).

За погрешность измерений на масс-спектрометре принимается значение стандартного отклонения S при определении концентрации каждого элемента в изучаемой пробе донных отложений. Абсолютная погрешность измерения, выраженная в единицах измерения (мг/кг или ppm), равна собственному значению стандартного отклонения; относительная погрешность, выраженная в процентах, равна значению относительного стандартного отклонения RSD. Анализ имеющихся на данный момент у З. И. Слукковского данных с учетом эталонного образца показывает, что измеренные значения концентраций

редких и рассеянных элементов в донных отложениях характеризуются значениями относительного стандартного отклонения (RSD) от 5.5 до 16.7 % и коэффициентом корреляции $R^2 = 0.997$ (табл. 3).

Таким образом, уровень относительной погрешности измерений не превышает допустимых значений для всех определенных в данном исследовании химических элементов, включая тяжелые металлы [Светов и др., 2015].

Таблица 3. Результаты измерения химического состава в мг/кг аттестованного стандарта БИЛ-1 методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-Series 2 (Thermo Fisher Scientific) в аналитической лаборатории ИГ КарНЦ РАН (2016–2018)

[Slukovskii, 2020]

Элемент	ПО	БИЛ-1 _{ат.}	±	БИЛ-1 _{изм.} , n = 32	RSD _{асб.}	RSD _{оми.} , %
Li	0.24	37.00	4.00	40.33	2.56	6.3
Sc	8.9	13.00	2.00	16.00	2.35	14.7
Ti	5.5	н/а	н/а	3712.47	406.88	11.0
V	3.1	110.00	10.00	106.19	10.69	10.1
Cr	2.5	66.00	4.00	66.24	6.18	9.3
Mn	0.46	н/а	н/а	3110.09	274.90	8.8
Co	0.034	18.00	2.00	16.16	0.98	6.1
Ni	6.2	54.00	6.00	50.09	4.44	8.9
Cu	0.68	52.00	7.00	48.28	3.24	6.7
Zn	0.51	96.00	14.00	102.59	5.61	5.5
Rb	0.086	93.00	5.00	95.40	6.38	6.7
Sr	0.13	266.00	30.00	262.43	19.73	7.5
Y	0.1	30.00	4.00	23.59	1.52	6.5
Zr	0.22	156.00	13.00	89.43	12.11	13.5
Nb	0.02	12.00	2.00	10.69	1.04	9.8
Mo	0.1	2.90	0.50	3.53	0.37	10.6
Cd	0.01	н/а	н/а	0.32	0.05	16.5
Sn	0.21	3.20	0.50	2.85	0.48	16.7
Sb	0.024	0.95	н/р	0.84	0.12	14.3

Cs	0.005	6.00	1.00	5.63	0.42	7.5
Ba	4.3	710.00	70.00	698.40	47.36	6.8
La	0.01	45.00	6.00	41.59	2.89	6.9
Ce	0.012	80.00	5.00	73.15	7.35	10.1
Pr	0.02	8.00	н/р	9.21	0.86	9.3
Nd	0.005	39.00	5.00	35.56	2.16	6.1
Sm	0.002	7.00	1.00	6.87	0.41	6.0
Eu	0.001	1.40	0.20	1.37	0.08	6.0
Gd	0.001	5.80	н/р	5.74	0.35	6.2
Tb	0.002	0.90	0.10	0.84	0.05	6.4
Dy	0.002	4.60	н/р	4.51	0.27	6.0
Ho	0.001	1.00	н/р	0.87	0.06	6.4
Er	0.001	2.60	н/р	2.51	0.16	6.5
Tm	0.001	0.42	н/р	0.36	0.03	7.5
Yb	0.001	2.90	0.40	2.38	0.15	6.5
Lu	0.001	0.40	0.05	0.35	0.03	7.5
Hf	0.001	3.90	0.70	2.44	0.19	7.7
W	0.03	4.30	н/р	3.83	0.34	8.9
Tl	0.057	н/а	н/а	0.55	0.07	12.0
Pb	0.21	21.00	3.00	20.91	1.31	6.3
Bi	0.073	н/а	н/а	0.47	0.07	14.6
Th	0.008	12.70	1.30	13.57	1.14	8.4
U	0.004	12.00	1.10	11.92	1.00	8.4

Примечания: *ПО* – предел обнаружения элемента; \pm – аттестованный диапазон погрешности измерения; *RSD_{абс.}* – величина абсолютной погрешности для собственных измерений; *RSD_{отн.}* – величина относительной погрешности для собственных измерений; н/а – неаттестованный элемент; н/р – не рассчитан диапазон погрешности

3.1.4. Электронная микроскопия

При проведении эколого-геохимических исследований донных отложений водных объектов, расположенных в пределах антропогенно нарушенных районов, особое внимание следует уделять анализу минеральных форм нахождения (или минеральных фаз)

зязрнзнтелей в современнх образований окружающей среды [Gradurek et al., 1999; Lanteigne et al., 2012; Слуковский, Даувальтер, 2019]. Формы и состав минеральных частиц из донных отложений хорошо исследовать при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA II LSH, работающего при 20 кВ, с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350.

Частицы исследуются с помощью обратного рассеянного электрона и вторичной электронной микроскопии и количественного химического анализа, полученного с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии. Важным методическим моментом при изучении образцов проб донных отложений является увеличение времени набора спектра в точках анализа до 120–200 с (вместо «стандартных» 60–90 с), что в итоге определяет относительно положительный результат проведенных исследований (рис. 18

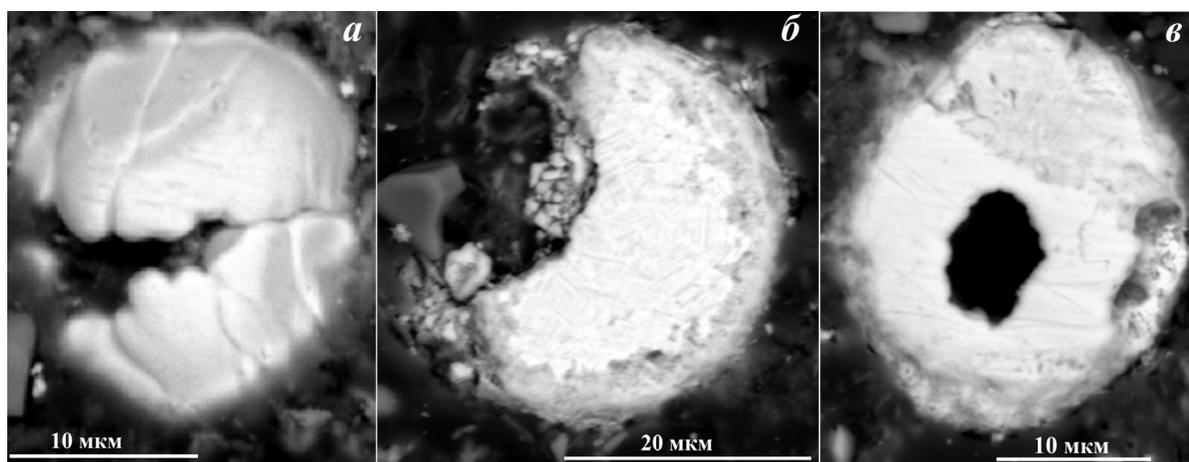


Рис. 18. Техногенные минеральные частицы из донных отложений оз. Нюдъявр (Мурманская обл.):
а – оксид Ni с примесью Fe и Co; б – сульфид Cu с примесью Fe и Ni;
в – сульфид Ni с примесью Fe и Co

Аналогичным образом можно изучать и любые другие минеральные образования, которые могут быть связаны с природными процессами, происходящими в водной среде [Нерадовский, Даувальтер, 2009; Strakhovenko et al., 2018].

3.2. Микропалеонтологические методы

3.2.1. Спорово-пыльцевой анализ

Палинология – наука о пыльце и спорах современных и ископаемых растений, которая представляет собой междисциплинарную дисциплину и включает различные научные направления. Среди них: палиноморфология (изучает форму, строение и развитие спор и пыльцевых зерен), палинотаксономия (сравнительно-

палиноморфологические исследования), мелиссопалинология (изучает пыльцу и споры, содержащиеся в меде и продуктах пчеловодства), медицинская палинология (выявляет закономерности и причины возникновения поллинозов), судебная палинология (изучает пыльцу для целей криминалистики); аэропалинология (исследует распространение пыльцы и спор ветром). Все более широкое распространение получает экологическая палинология – наука о состоянии окружающей среды и экологического мониторинга как в настоящем, так и в прошлом нашей планеты. Важнейшее направление палинологии – палеопалинология, изучающая ископаемые пыльцу и споры (в литературе обычно используется термин «палинология»)

Ценность палинологического анализа обусловлена тем, что пыльца и споры высших растений являются единственной группой палеонтологии в целом, которая присутствует в осадках разного возраста и всех литолого-генетических фаций. Растения продуцируют колоссальное количество пыльцы и спор (до сотен тысяч экземпляров в одном цветке), а оболочка (спородерма) пыльцевых и споровых зерен обладает исключительной стойкостью к разрушающему механическому, химическому и биохимическому воздействию, которому она может подвергаться процессе фоссилизации. Микроскопические размеры (в интервале примерно от 10 до 200 мкм) и особенности морфологического строения способствуют широкому распространению пыльцы и спор и их захоронению в осадках.

Основное применение палеопалинология находит в геологии, палеогеографии, археологии и др. В данной главе рассматривается применение палеопалинологии в геологических, палеогеографических, археологических научных исследованиях при изучении донных отложений малых озер. При этом, как правило, используется термин «палинологический, или спорово-пыльцевой, анализ». Объектами палинологического анализа являются не только пыльца и споры, но и так называемые непыльцевые палиноморфы (колонии водорослей *Botryococcus* и *Pediastrum*, устьица хвойных пород – специфических прочных клеток эпидермиса хвои и др.), а также дочетвертичные спороморфы и угольные частицы. Весьма важно привлечение данных о макрофоссильных остатках высших и низших растений, в том числе плодов, семян и макроспор. Их находки в озерных отложениях свидетельствуют о произрастании идентифицированных по ним растений близ водоема.

Озерные отложения являются уникальными архивами непрерывных данных об изменениях природной среды, происходивших на локальном, региональном и даже глобальном уровнях. Накопление и расшифровка таких природных архивов позволяет не только реконструировать растительность водосборной территории, но и выявить

пространственное проявление тех или иных климатических изменений в определенные временные интервалы в прошлом [Рудая, 2010]. Донные отложения озер являются наиболее благоприятными для палинологического анализа также вследствие умеренного переотложения, происходящего в самой верхней части донных отложений, которые формировались в течение нескольких лет. Это нивелирует различия в количестве спор и пыльцы, зависящие от различной продуктивности растений и неустойчивой атмосферной циркуляции в разные годы [Devis, 1968]. Следует отметить, что лучше всего пыльца и споры растений сохраняются именно в озерных отложениях, то есть там, где анаэробные условия постоянны.

Отбор и лабораторная обработка образцов для палинологического анализа

Отбор образцов является первым шагом при палинологических исследованиях. При сборе образцов для палинологического анализа необходимо соблюдать следующие правила:

– стараться не допустить загрязнение образцов материалом из выше- или нижележащих слоев, а также занесенным из воздуха;

– тщательно вести документацию (полевой дневник), которая должна содержать номер образца, топографическую привязку, номер керна, номер геологического разреза, глубину взятия образца, данные о составе и структуре слоя, дату взятия образца;

– необходимо брать последовательную серию образцов, охватывающую весь разрез.

В противном случае невозможно будет построить спорово-пыльцевую диаграмму, а следовательно, решить задачи как стратиграфического расчленения разреза, так и реконструкции динамики природной среды [Пыльцевой анализ, 1950].

Пробы отбираются непосредственно в полевых условиях. Для более детального изучения и частого отбора керны упаковывают в пластиковые трубки и перевозят в лабораторию. Количество осадка, достаточное для палинологического анализа, зависит от генетического типа отложений. Так, навеска глины составляет от 40 до 100 г, пески – 100 г и более, гиттия (сапропель) – 10 г. Для определения концентрации пыльцы в осадке берут пробу определенного веса или объема (также в зависимости от генетического типа отложений: гиттия – 1–2 см², глины – до 10 см²). Для современных палинологических исследований характерно повышение детальности, то есть более частый отбор проб из отложений.

Химическая обработка проб для спорово-пыльцевого анализа

Для извлечения пыльцы и спор из отложений их подвергают специальной лабораторной обработке. Существует довольно большое количество различных методов,

которые неоднократно рассматривались в литературе: [Пыльцевой анализ, 1950] и др. В практике различных лабораторий применяют те или иные указанные методы с некоторыми различными приемами, полученными в ходе длительной практики. Подробно таковые описаны в методических пособиях Н. А. Рудой [Методические подходы..., 2011], [Николаевская и др., 2015]. Ниже приводится методика, применяемая в Институте геологии КарНЦ РАН при обработке органических и минеральных донных отложений. Следует отметить, что все работы по подготовке проб проводятся в вытяжном шкафу.

Проверка отложений на присутствие в них карбонатов. На поверхность образца наносят несколько капель раствора 10%-й соляной кислоты (HCl). Если наблюдается «вскипание», потрескивание, то порода карбонатная и ее следует обработать соляной кислотой для удаления карбонатов. Навеску помещают в стеклянный стакан, емкостью 1 л (на стакане отмечают номер образца), и заливают 10%-м раствором соляной кислоты с целью растворения и удаления карбонатов. Первоначально следует налить столько кислоты, чтобы полностью смочить ее пробу, затем подливать понемногу в несколько приемов, часто помешивая осадок стеклянной палочкой. Если к концу рабочего дня реакция с HCl не прекращается, добавить соляной кислоты побольше, прикрыть стакан и оставить на ночь. Утром следующего дня, если реакция завершилась или будет очень слабой, можно перейти к отмывке образцов от кислоты. Пробу породы, находящейся в стакане (с кислотой вместе), залить дистиллированной водой, тщательно перемешать и отстаивать не менее 4–5 часов. Затем воду слить при помощи сифона, добавить чистую воду, образец перемешать и снова отстаивать. Отмывка повторяется 3–4 раза.

Отметим, что для подсчета концентрации зерен на первом этапе в образец определенного веса или объема добавляются растворимые в соляной кислоте таблетки с калиброванными маркерами – ацетоллизированными спорами плауна, пылью эвкалипта или полистериновыми сферами. Во время анализа маркеры подсчитываются наряду с пыльцевыми зернами и спорами. Зная подсчитанное в образце количество фоссильных зерен, подсчитанное количество маркеров, число маркеров в одной таблетке и навеску, взятую для химической обработки образца, рассчитывают концентрацию пыльцы и спор в образце, которая является основным показателем насыщенности отложений пылью и спорами. После приемов, описанных выше, осадок заливают ледяной уксусной кислотой (CH₃COOH), которая оттягивает из него воду, тщательно перемешивают сухой палочкой и центрифугируют 5 минут (обезвоживание повторяется дважды). Слив кислоту второй раз, пробирки опрокидывают на фильтровальную бумагу, отстаивают 20 минут.

После отмывки породы сливают в фарфоровую чашку (на которой записывают номер образца), заливают 10%-й щелочью КОН или NaOH и нагревают на плитке (при этом

следует периодически ее перемешивать). При закипании чашку сразу же снимают с плитки. Обработка породы со щелочью производится с целью удаления растворимых веществ и полной дезинтеграции осадка.

Примечание: если анализируемая порода не реагирует с соляной кислотой (HCl), процесс обработки следует начинать с варки образцов в щелочном растворе.

После охлаждения содержимое чашек тщательно перемешивают и осторожно через сито (сито с размером ячеек не более 0,25 мм) сливают в стакан (предварительно как на чашках, так и на стаканах следует написать номера образцов). В чашки добавляют свежую дистиллированную воду, при этом струей воды следует смывать содержимое и со стенок чашек. Затем породу в чашке снова перемешивают и опять тонкую часть осадка сливают в стакан. Процесс повторяется до тех пор, пока вода, добавленная в чашку, не станет светлой и взвешенных в ней частиц станет ничтожно мало. Грубая часть осадка остается в чашке и в дальнейшем процессе не участвует.

Содержимому стаканов необходимо дать отстояться в течение ночи, после чего сифоном или очень осторожно через край слить щелочной раствор, оставив в стакане осадок и две такие же части раствора (ни в коем случае слив не повторять после того, как стакан будет перевернут в нормальное положение). Оставшийся осадок взболтать, наполнить им центрифужные пробирки, уравновесить и центрифугировать в течение 5–10 минут при 2000–2500 об/мин. Собрав осадок в центрифужные стаканчики, его следует промыть водой (перемешивать и центрифугировать) 4–5 раз. (Отмыть осадок можно и в стаканах: залить в них дистиллированную воду и дать отстояться 5–6 часов, а затем слить. Процедуру повторить 4–5 раз, после чего осадок собрать в центрифужные стаканчики.)

Примечание: если в воде останется взвешенная муть после отмыва, каплю «мути» следует рассмотреть под микроскопом; если в ней не окажется пыльцы, образец еще два раза отцентрифугировать, сливая после этого «муть».

После последнего центрифугирования воду осторожно слить, центрифужные пробирки опрокинуть вверх дном на фильтровальную бумагу, дать стечь воде со стенок стаканов и с поверхности осадка. Для этого достаточно 30–40 минут.

Когда вода стечет, центрифужную пробирку в неперевернутом виде (вверх дном) вытереть той же фильтровальной бумагой по краям и внутри, не задевая при этом осадка. В полученный осадок добавить три объема тяжелой жидкости (один объем составляет осадок), удельный вес которой 2,25 (смесь CdI_2 , KI и дистиллированной воды). Порода в пробирке тщательно перемешать сухой палочкой и центрифугировать в течение 5–10 минут (в зависимости от характера породы). Центрифугированием в тяжелой жидкости достигается отделение пыльцы от твердой части осадка: пыльца легче жидкости и

всплывает на поверхность, а минеральная часть, как более тяжелая, оседает на дне стаканчика.

После первого центрифугирования в тяжелой жидкости породу еще раз перемешивают той же палочкой и еще раз центрифугируют. Затем максимально обогащенную пылью жидкость сливают в подготовленные стаканчики объемом 100–200 мл, в стаканчик доливают дистиллированную воду до полного объема. Содержимое стаканчика перемешивают и отстаивают в течение ночи – пыльца оседает на дно.

Утром отстоявшуюся жидкость крайне осторожно сливают. Оставшуюся часть раствора следует отцентрифугировать в несколько приемов (по 5–7 минут при 1500–2000 об/мин), собирая осадок в стеклянные пробирки. Затем осадок необходимо вновь промыть 4–5 раз, то есть центрифугировать в дистиллированной воде. Отработанную тяжелую жидкость, смешанную с водой, выпаривают, фильтруют, доводя ее удельный вес до 2,25, после чего ее снова можно использовать.

После этого центрифужные пробирки устанавливают вверх дном на фильтровальную бумагу и оставляют на 40–60 минут, для того чтобы стекла оставшаяся вода.

Пробирки заливают глицерином приблизительно на 4–5 мм выше осадка. Пробирку закрывают и подписывают, указывая номер разреза, номер образца и глубину отбора.

Ацетолизный метод Г. Эрдтмана [Erdtman, G., 1943] применяют для растворения макроостатков растений; помимо этого, пыльца и споры увеличиваются в размерах и окрашиваются в более контрастный цвет, что способствует детальному изучению их морфологических особенностей и более точному определению пыльцы и спор, зачастую вплоть до вида продуцирующего растения.

После вышеописанных приемов осадок заливают ледяной уксусной кислотой (CH_3COOH), которая оттягивает из него воду, тщательно перемешивают сухой палочкой и центрифугируют 5 минут (обезвоживание повторяется дважды). Слив кислоту второй раз, пробирки опрокидывают на фильтровальную бумагу, отстаивают 20 минут.

Пока пробирки отстаиваются, на фильтровальной бумаге готовится к работе «водяная баня» и ацетолизирующая смесь: 9 частей уксусного ангидрида $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$ с одной частью концентрированной серной кислоты (H_2SO_4). Готовится смеси столько, сколько нужно для работы в продолжение одного дня. Посуда и палочки должны быть совершенно чистыми и сухими, так как примешивание к смеси воды может быть взрывоопасным. В толстостенный мерный цилиндр наливают нужный объем ледяной уксусной кислоты, затем осторожно, по стенке сосуда, каплями, добавляют концентрированную серную кислоту. Смесь осторожно перемешивают совершенно сухой стеклянной палочкой.

Следует отметить, что при приготовлении смеси сосуд и содержимое нагревается и их следует охладить.

Центрифужные пробирки с осадком устанавливают в штатив. Смесь размешивают палочкой, наливают в пробирки (5 частей смеси на 1 часть осадка), перемешивают, затем пробирки ставят на водяную баню в вытяжном шкафу. Палочки из пробирок не вынимают – смесь постоянно помешивают. Нагревание начинается в воде комнатной температуры и доводится до 70 °С, максимум до 80° (температура не должна превышать последней цифры, так как центрифужные пробирки могут лопнуть, и тогда произойдет реакция между горячей водой и смесью).

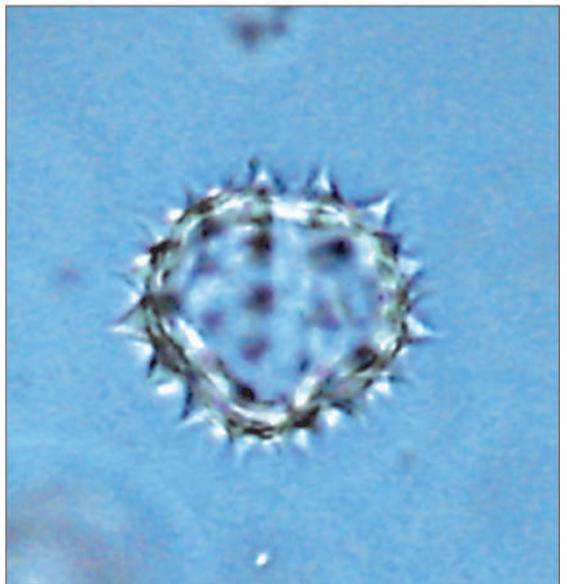
Затем пробирки с осадком остужают и осаждают в центрифуге. Смесь сливают из пробирок в отдельный стакан и дезактивируют содой (Na_2CO_3).

Оставшийся осадок заливают ледяной уксусной кислотой, перемешивают и центрифугируют. Слив уксусную кислоту (которую также дезактивируют Na_2CO_3), осадок 4–5 раз промывают центрифугированием в дистиллированной воде, после чего пробирки опрокидывают на фильтровальную бумагу и отстаиваются 40–60 минут, затем заливают глицерином, закрывают и подписывают (как было указано выше). Данный метод имеет ограничения из-за сложности получения реактивов.

Микроскопирование и подсчет пыльцевых зерен и спор

Для определения и подсчета пыльцы и спор готовят временные препараты, тщательно перемешивая осадок и глицерин. Эта смесь не должна быть густой, так как это затрудняет подсчет и определение микрофоссилий. Наиболее благоприятны препараты со встречаемостью 3–5 пыльцевых зерен и спор в одном поле зрения (при увеличении в 400 раз). Небольшую каплю с помощью стеклянной палочки или пипетки Пастера наносят на центральную часть стекла и прижимают покровным стеклом, причем опуская его не сверху, а с одного края, не допуская тем самым скопления микрофоссилий по краям.

Для микроскопирования используется световой микроскоп проходящего света с увеличением в 200–400–600 раз.



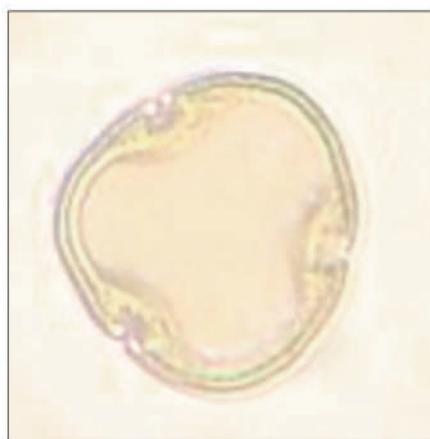


Рис. 19: 1 – водное растение Nuphar и его пыльца; 2 – кипрей (Epilobium) и его пыльца; 3 – Asteraceae и пыльца Aster type; 4 – Huperzia selago и пыльца; 5 – Tilia и пыльца (1 – фото О. В. Лазаревой; 2 и 3 – фото Т. С. Шелеховой; 4 – <https://www.lekrs.ru/huperzia-selago/>; 5 – <https://www.robertbarrington.net/linden-tilia-spp-potential-sedative/>)

При идентификации пыльцы спор используются определители [Куприянова, 1965; Куприянова, Алешина, 1967, 1972, 1978; Моносзон, 1973; Бобров и др., 1983; Reille, 1992, 1995, 1998; Moore et al, 1991; Савельева и др., 2013; электронные базы данных: <http://botany-collection.bio.msu.ru/pollen-speciment/index>; www.PalDat.org и др.]. Помимо этого, определения пыльцы опираются на созданную в Институте геологии КарНЦ РАН под руководством Э. И. Девятовой эталонную коллекцию пыльцы и спор современных растений.

При подсчете пыльцы и спор необходимо насчитывать статистически значимое их количество. В Институте геологии при исследовании донных отложений, как правило, регистрируется не менее 500 пыльцевых зерен. В позднеледниковых осадках, где

концентрация пыльцы незначительна, насчитывается 250 зерен пыльцы. Регистрируют также ацетолизированные споры-маркеры (в случае если таблетки внесены в образцы), дочетвертичные спороморфы, устьица хвойных пород, водоросли *Pediastrum* и другие микрофоссилии. Важно отмечать тератоморфную и разрушенную пыльцу, а также угольные частицы. Все определенные объекты фиксируют на бланке палинологического анализа, на котором также указывают место отбора, номер пробы, глубину отбора. При регистрации могут использоваться специальные счетные устройства (например, медицинские счетчики для подсчета элементов крови), где на клавиши наносятся этикетки с названием того или иного таксона.

Спорово-пыльцевые диаграммы

Весь полученный фактический материал оформляется в виде электронных таблиц, которые потом обрабатываются статистическими методами и используются для построения диаграмм. Спорово-пыльцевая диаграмма (рис. 20) отражает процентное распределение таксонов и строится с применением специализированной компьютерной программы TILIA-2 и TILIA GRAPH [Grimm, 1992]. Используются также и программы широкого пользования (MS Excel, MS PowerPoint, CorelDraw).

Спорово-пыльцевые диаграммы делят на палинозоны, которые представляют собой биостратиграфические последовательности внутри диаграммы, характеризующиеся особым типом палинофлоры. Выделение зон производится как визуальным методом, так и с помощью кластерного анализа, например в программе CONISS [Grimm, 1987, Рудая, 2010]. Полученные результаты сопоставляются с данными радиоуглеродного датирования. В основе периодизации разреза донных отложений лежит схема Блитта – Сернандера, модифицированная Н. А. Хотинским (1977) и уточненная для Карелии [Г. А. Елина, 1981].

Тенденция изменений процентного содержания пыльцы таксонов более важна для выделения палинозон и интерпретации данных, чем просто процентное содержание пыльцы тех или иных таксонов.

Необходимо отметить, что процентное содержание таксонов рассчитывается разными методами. В лаборатории четвертичной геологии при исследовании особенностей деградации верхневалдайского оледенения, формирования рельефа и четвертичных отложений изучались донные отложения позднеледникового времени, где каждый определенный таксон имеет важное значение. В этом случае за основу (100 %) нами принимается сумма пыльцы и спор.

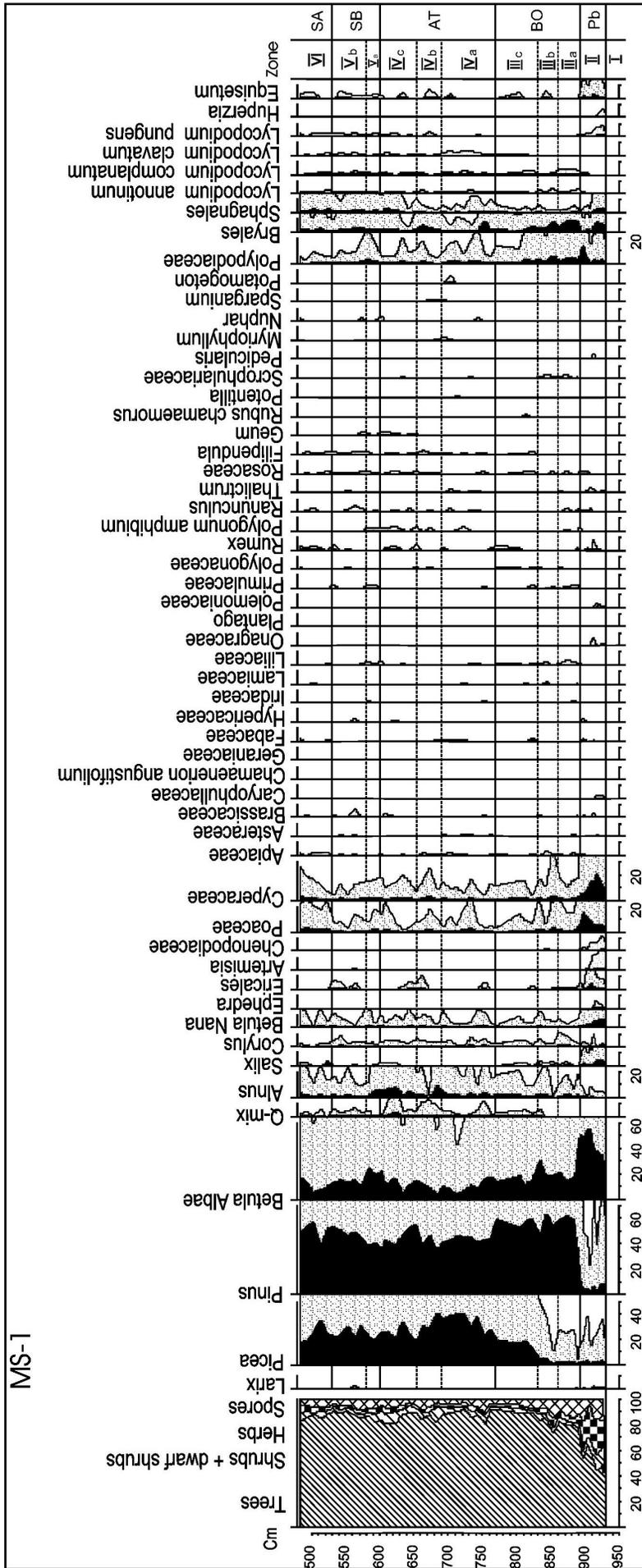


Рис. 20. Спорово-пыльцевая диаграмма донных отложений оз. Долгое (район п. Малолушка Архангельской обл.)

В ряде случаев в отложениях содержится большое количество пыльцы, отражающей локальный состав растительности (Cyperaceae, Poaceae). Включение такой пыльцы в расчетную сумму способно исказить соотношения пыльцы лесообразующих деревьев в палиноспектрах и, следовательно, затруднять реконструкцию истории развития лесных формаций. Подробная методика расчета процентных соотношений и построения различных типов диаграмм описана [Николаевская и др., 2015].

Пыльцевые диаграммы для определенных районов исследований, при построении которых использовались разные методы подсчета процентных соотношений таксонов и разные способы графического представления результатов спорово-пыльцевого анализа, сходны в основных чертах, что делает возможным их взаимную корреляцию и сравнение растительности для тех или иных временных интервалов голоцена. Это подтверждается сравнением диаграмм отложений голоцена Карелии, представленных в монографиях [Девятова, 1986], [Елина, 1981; 2000] и др. На возможность корреляции разных типов диаграмм для Верхневолжской низменности указывает также О. К. Борисова [Борисова, 2018].

Интерпретация палинологических данных и некоторые вопросы реконструкции

Интерпретация полученных данных – наиболее сложная сторона палинологического анализа. Формирование спорово-пыльцевых спектров является весьма сложным процессом, зависящим от множества причин.

Связь между составом растительности и отражающими его спорово-пыльцевыми спектрами обусловлена большим количеством факторов, которые можно разделить на биотические и абиотические. К абиотическим факторам могут быть отнесены: размеры и конфигурация водоемов, рельеф местности, рассеивание пыльцы и спор под воздействием физического состояния атмосферы, под воздействием гидродинамических условий, фациальное распределение, особенности осадка, вмещающего спорово-пыльцевой спектр, его литологический и гранулометрический состав. Изучение влияния этих факторов на формирование спектров представлено в работах: [М. В. Кабайлене, 1976; В. А. Вронский, 1976; Е. С. Малясова, 1976; Лийвранд, 1990; и др.].

К биотическим факторам относятся продуктивность пыльцы и спор различными растениями. Колебания содержания пыльцы растений, обладающих высокой продуктивностью (например, сосны, березы и др.), могут исказить реальные изменения количества пыльцы других таксонов. Следует отметить, что пыльцевая продукция вида, помимо присущих ему особенностей, зависит, в частности, от положения вида растения в фитоценозе (например, отдельно стоящее дерево продуцирует пыльцы больше, чем дерево в составе древостоя). Заросли ольхи, ивы или других кустарников на берегах озер

зачастую являются специфическим растительным фильтром, перехватывая значительную часть пыльцы, разносимой ветром и тем самым искажая представленность пыльцы и спор в палиноспектрах.

Другой биотический фактор – морфологические особенности, размер и плотность пыльцы и спор, во многом обуславливающие их транспортабельную способность. Пыльца растений, опыляемых насекомыми (энтомофильные растения), как правило, крупная, тяжелая, разносится на небольшие расстояния в пределах их естественных ареалов [Мазей и др., 2018]. Пыльца ветроопыляемых растений (анемофильных), напротив, распространяется на большие расстояния. Кроме того, некоторые растения не цветут в те или иные годы вследствие неподходящих погодных условий: в таком случае процент пыльцы этого вида в спорово-пыльцевых спектрах будет незначительным. В условиях холодного климата, например на Крайнем Севере, многие растения выработали различные формы вегетативного размножения [Тихомиров, 1963]. Следовательно, палиноспектры не тождественны в полной мере реально существовавшим растительным сообществам. Для более объективной интерпретации полученных палинологических данных разными исследователями рассчитаны коэффициенты соответствия состава и процентного содержания пыльцы древесных растений в спектрах с их составом и долей участия в современном древостое [Faegri, Iversen, 1964; Заклинская, 1951; Кабайлене, 1969, Елина, 1981, Филимонова, 2007; и др.].

Спорово-пыльцевые спектры позднеледниковых озерных отложений (ленточные и массивные глины, алеариты) содержат, помимо пыльцы и спор окружающих местообитаний, переотложенные и дальнезаносные пыльцевые зерна. Переотложенные дочетвертичные пыльцевые зерна и споры легко выделяются из состава спектров по своим морфологическим особенностям, а вот переотложенные и автохтонные пыльцевые зерна и споры четвертичного возраста часто по морфологии почти неразличимы. Степень сохранности – признак явно недостаточный для разделения разновозрастных частей спектров, так как сохранность пыльцы, отложенной *in situ*, может значительно нарушаться вследствие окислительных процессов и деятельности бактерий. Более четкая дифференциация пыльцы, отложенной *in situ*, и переотложенной пыльцы достигается при палеоэкологическом анализе [Гричук и др., 1969], в результате которого выделяется комплекс пыльцы и спор с достаточно сходной экологией.

В изученных нами позднеледниковых донных отложениях наряду с пылью тундровых, степных и лесных видов отмечается пыльца термофильных пород. Обитание термофильных пород в условиях сурового климата приледниковой зоны расценивается как невозможное. Сомнителен дальний перенос ветром тяжелой, крупной пыльцы

термофильных древесных пород. Следовательно, участие в спорово-пыльцевых спектрах позднеледниковых отложений пыльцы термофильных пород есть результат переотложения. Вымывание пыльцы из более древних осадков и их переотложение было обусловлено низкими температурами, малоснежными зимами, сильными стоковыми ветрами, водными потоками с тающего ледника, что приводило к активизации эрозионных процессов, особенно в условиях, когда грунты еще не были закреплены растительностью. Таяние массивов мертвого льда и многолетней мерзлоты приводило к процессам солифлюкции, что также способствовало переотложению. Подтверждением этому служит присутствие в изученных отложениях микрофоссилий дочетвертичных растений.

Вполне вероятно, что переотложенной является и часть пыльцы бореальных деревьев, долю которых трудно, да и невозможно определить, но, вероятнее всего, значительная ее часть поступила в отложения в результате ветрового переноса, то есть является дальнезаносной. Тем не менее при исключении только термофильной пыльцы достигается более достоверное соотношение между палиноспектрами и составом растительности. При интерпретации спорово-пыльцевых диаграмм позднеледниковья следует учитывать, что в условиях несомкнутого растительного покрова, то есть при отсутствии естественного растительного фильтра, дальность разноса пыльцы значительно увеличивается.

Дополнить и уточнить интерпретацию процентных спорово-пыльцевых диаграмм позволяет определение концентраций пыльцы в отложениях. Этот метод получил широкое распространение в мировой практике палинологических исследований в последние десятилетия. Расчет концентрации для каждого таксона (то есть количества пыльцевых зерен или спор в определенном объеме или навеске осадка) проводится по известной концентрации «экзотического» компонента – специально добавляемых к осадку «маркирующих» спор [Stockmarr, 1971]. Для этого к миниатюрным образцам определенного объема на начальной стадии лабораторной обработки добавляются таблетки, содержащие известное количество спор *Lusorodium*, специально производимых для этой цели. В процессе анализа «маркирующие» споры, заметно отличающиеся от спор плаунов, находящихся в препарате *in situ*, благодаря их специальной предварительной подготовке, подсчитывают одновременно с пыльцой и спорами, выделенными из данного образца, что позволяет проследить по всему разрезу изменения концентрации для каждого таксона. Все расчеты проводятся при помощи компьютерной программы для статистической обработки результатов пыльцевого анализа TILIA [Grimm, 1992].

Кроме того, при интерпретации палиноспектров, формировавшихся в донных отложениях озер, следует учитывать, что при увеличении среднего диаметра частиц

озерных отложений концентрация пыльцы и спор уменьшается. На дальность заноса и скорость оседания пыльцы разных растений в озере влияют также морфометрические особенности озерных котловин. Так, в разных частях мелководных озер с плоскими котловинами состав спектров и концентрация пыльцы и спор довольно однообразны, тогда как в озерах с крутыми склонами котловины отложения склоновой и глубоководной зоны отличаются более значительной концентрацией пыльцы и спор.

Реконструкция растительного покрова

Непосредственным применением палинологического метода являются реконструкции растительного покрова. В основе его применения для реконструкций лежит связь между количеством пыльцы определенного вида растений в отложениях и количеством представителей этого вида в составе растительности, выявленная путем сопоставления результатов пыльцевого анализа современных осадков (поверхностных, или рецентных, проб) с составом современной растительности. В подавляющем большинстве случаев пыльцевые спектры закономерно отражают основные черты растительных сообществ, которые их образовали. Для успешной реконструкции полученных палинологических данных необходимы знания об экологии и физиологии растений региона.

Кроме того, определение пыльцы до ранга вида, даже рода весьма затруднительно, часто невозможно. Некоторые семейства включают множество видов, совершенно различных по экологии и географическому распространению. В настоящее время для унификации реконструкции растительности применяется метод биомизации, который позволяет реконструировать растительность прошлого на основе современных аналогов [Overpeck et al., 1985; Тарасов, 2000].

Установить качественные характеристики климата (холодно, тепло, влажно, сухо) с помощью палинологических данных достаточно просто [Faegri, Iversen, 1989]. Количественная оценка климата представляется более сложной задачей.

Один из методов реконструкции климатических показателей по палинологическим данным основан на изучении состава ископаемых флор и разработан В. П. Гричуком [Гричук, 1969]. Метод ареалограмм основан на допущении того, что границы ареала растения определяются преимущественно его требованиями к тепло- и влагообеспеченности. Карты современных ареалов таксонов растений, пыльца и споры которых были идентифицированы, объединяются в одну карту, что позволяет определить центр современной концентрации видов ископаемой флоры. Чем больше было определено видов растений, тем меньше область их совместного произрастания и точнее характеристика климатических условий [Гричук, 1969, 1985].

Для реконструкций климатических параметров также применяются методы, использующие статистические связи между составом современных спорово-пыльцевых спектров и климатическими условиями их формирования. Эти методы реконструкции количественных показателей климата по палинологическим данным достаточно подробно описаны в работах О. К. Борисова [О. К. Борисов, 2008, 2018].

Применение палинологического метода в практике Института геологии Карельского научного центра РАН

В геологических исследованиях палинологический метод применяется для выяснения геологического возраста исследуемых пород и проведения детального хроностратиграфического расчленения разреза.

В геологии четвертичного периода палинологический метод является основным среди биостратиграфических методов. В рамках большинства тем лаборатории («Дегляциация восточной части Скандинавского ледника», «Геология и палеоэкология плейстоцена С-З Российской Федерации», «Стратиграфия и палеогеография среднего и позднего плейстоцена Севера Европейской части России» и др.) палинологический метод применялся для уточнения стратиграфической шкалы позднеледникового времени, определения возраста краевых стадияльных образований последнего верхневалдайского ледникового покрова [Геология Карелии, 1987; Ekman I., Iljin V., 1995]. Также было установлено, что в толще донных отложений с уверенностью выделяются слои аллереда и позднего дриаса. Выделение так называемого онегозерского (плюсского) интерстадиала, отложения которого, как считалось ранее, занимают территорию между краевыми образованиями вепсковско-кресецкой и лужской стадий, не подтвердилось. По данным палинологического, варвометрического анализа наиболее древние горизонты донных отложений начали формироваться в среднем дриасе [Демидов, 2005, Лаврова, 2004]. Следует отметить, что отложения аллереда и позднего дриаса достаточно легко выделить: в палиносpectрах отложений аллереда преобладает пыльца древесных пород, тогда как в палиносpectрах отложений позднего дриаса возрастает вклад пыльцы травянистых растений.

Как уже упоминалось выше, произрастание древесных пород в приледниковой зоне сомнительно. При биостратиграфическом расчленении позднеледниковых отложений заносная пыльца древесных растений приобретает важное значение, поскольку перенос ее из областей, расположенных к югу, юго-западу и юго-востоку от проозера, определяет соотношение древесные/травянистые (процентное соотношение пыльцы древесных пород и пыльцы травянистых растений), которое, в свою очередь, обусловлено

интерстадиальными потеплениями и стадиальными похолоданиями. Зачастую положение разреза в крайне приледниковых условиях делает спорово-пыльцевые спектры отложений стадиалов и интерстадиалов мало отличимыми друг от друга по своим палинологическим характеристикам. Возможно, это происходит вследствие охлаждающего влияния ледника на местную растительность, при большой скорости аккумуляции осадков, обильного засорения спектров как переотложенной, так и заносной пылью растений.

Роль спорово-пыльцевого анализа при палеогеографических исследованиях

Результаты спорово-пыльцевого анализа имеют прямое отношение к реконструкции растительности, климатических условий, развития гидросети и других компонентов ландшафта исследуемого региона.

Как упоминалось выше, большинство исследований лаборатории четвертичной геологии было связано с темами, в рамках которых палинологический анализ применялся при изучении позднеледниковых донных отложений. Следует отметить, что исследованные позднеледниковые отложения имели низкую насыщенность пыльцевыми зёрнами. Это было обусловлено высокой скоростью седиментации и огромным количеством приносимого в водоемы минерального материала, а также незначительным привнесом микрофоссилий в связи со слабо развитым фрагментарным растительным покровом, низкой пыльцевой и споровой продуктивностью растений в холодных климатических условиях. Другая особенность донных отложений позднеледникового времени – насыщенность их переотложенной и дальнезаносной пылью.

Растительность не имела аналогов в современности, что в значительной степени ограничивает возможности применения принципа актуализма в реконструкции палеосообществ позднеледниковой эпохи. Для этой цели наиболее важное значение приобретают не только изменения и состав палиноспектров, но и анализ ископаемой флоры. Идентифицирована пыльца растений лесных, тундровых, лесотундровых, степных и луговых сообществ, пионерных группировок на несформированных и нарушенных почвогрунтах, каменистых и щебнистых субстратах. Выявлена пыльца растений – индикаторов различных экологических условий позднеледникового времени. Так, о разнообразии и особенностях грунтов свидетельствуют петрофиты, псаммофиты, галофиты, кальцефиты и ацидофилы. Определена также пыльца растений-гелиофитов, хионофилов и хионофобов. Проведенный географический и эколого-ценотический анализ комплексной ископаемой флоры позволил получить детальную реконструкцию палеосообществ позднеледниковья [Геология..., 2002; Лаврова, 1999; Лаврова, Филимонова, 2018].

Палинологические данные являются важным инструментом в реконструкции палеогеографических событий. На основании комплекса методов, в том числе палинологического [Девятова, 1986], была создана схема изменений уровня Онежского озера в голоцене.

Отделение и обособление малых и средних озер от приледниковых водоемов, помимо изменений в стратиграфии озерных отложений, фиксируется заметным увеличением вклада пыльцы прибрежно-водных и водных видов растений (*Cyperaceae*, *Poaceae* (главным образом, *Phragmites australis*), *Nuphar*, *Nymphaea*, *Myriophyllum*, *Potamogeton*, *Sparganium*, *Typha angustifolia*, *T. Latifolia*, *Drosera*, *Menyanthes trifoliata*, *Naumburgia*, *Polygonum amphibium*, *Equisetum*).

В результате многочисленных исследований установлено, что на ранних стадиях дегляциации малые озера возникали неодновременно в разновозрастных зонах дегляциации и их образование существенно запаздывало относительно убывания ледникового края. В то время как освобождение территории юго-восточной Фенноскандии ото льда произошло 13–14 тыс. лет назад, формирование некоторых водоемов началось в аллереде, а большей части – в раннем голоцене, то есть существенно позднее дегляциации. Такое запаздывание обусловлено тем, что для ранних стадий деградации ледникового покрова был характерен ареальный тип дегляциации, при котором обширные площади льда в периферийной части оледенения теряли связь с отступающим ледником, образуя массивы мертвого льда, погребенного под отложениями супрагляциального комплекса, таяние которых в условиях многолетней мерзлоты продолжалось тысячи лет [Лаврова, Демидов, 2003].

Согласно палинологическим и радиоуглеродным данным, первые малые озера, расположенные в зоне краевых образований древнего дриаса (14 тыс. лет назад) или в дистальном направлении от них начали образовываться лишь в аллереде или позднем дриасе [Wohlfarth et al., 2002, 2004]. Нижние горизонты озерных отложений представлены специфическими сезонно-слоистыми алевритовыми глинами. Подобная текстура отражает интенсивность таяния массивов мертвого льда, окружавших эти палеоводоемы. Десятки исследованных озер этого района образовались лишь в голоцене – пребореале или даже бореале, после окончательного таяния мертвого льда. В строении донных отложений таких озер и болот региона выделяется маломощный горизонт алевритов с гравием, сформировавшихся, вероятно, в подледных условиях таяния глыб мертвого льда. Выше они перекрываются толщей сапропелей голоценового возраста [Демидов, Лаврова, 2001].

Резко изменившийся характер спорово-пыльцевых спектров наряду со столь же резким, без плавного перехода, изменением генетического типа отложений может

указывать на перерыв в осадконакоплении. Так, подобные явления в спектрах и в донных отложениях были отмечены в одном из озер Андомской возвышенности, в отложениях которого палиноспектры, характерные для пребореального времени, сменяются типично атлантическими. По нашему мнению, значительное потепление климата в пребореале и бореале привело к окончательному таянию мертвого льда, подпруживающего озеро. Это вызвало спуск вод водоема и привело к размыву осадков бореала. Впоследствии в обмелевшем озере начинают накапливаться торфа [Шелехова, Лаврова, 2019].

Интересен опыт применения палинологического анализа при решении вопросов изменения береговой линии Белого моря в позднеледниковье и голоцене. Главным объектом исследования являлись донные отложения, накопившиеся в котловинах малых озер, расположенных на побережье, в условиях разных седиментационных обстановок, которые менялись здесь под влиянием гляциоизостатического поднятия суши, эвстатического изменения уровня моря, тектонических перемещений земной коры.

В составе палиноспектров, выделенных в морских отложениях малых озер, постоянно встречается пыльца растений-галофитов *Atriplex nudicalis*, *Salicornia herbacea*, *Plantago maritima*, а также пыльца, по своим морфологическим особенностям принадлежащая типу *Aster*. Ныне галофитная приморская растительность формируется на морских отложениях и образована настоящими галофитами или видами, выносящими большее или меньшее засоление. По данным Н. В. Заславской [Заславская, 2007], на западном побережье Белого моря на засоленных местообитаниях отмечено 99 видов растений – облигатные, факультативные виды и гликофиты. На нижнем уровне, постоянно заливаемом морем, произрастают виды, приспособленные к жизни на сильнозасоленных почвах. К этой группе растений относятся солеросы (*Salicornia herbacea*), подорожник морской (*Plantago maritima*), астра морская (*Tripolium vulgare*) и некоторые другие. Наиболее густые травостой создает осока обертковидная (*Carex subspathacea*). Под действием прибоя выше нижнего уровня образуются песчаные и каменистые гряды, на которых произрастают лебеда голостебельная (*Atriplex nudicalis*).

Для определения пыльцы были использованы атласы-определители, эталонная коллекция Института геологии КарНЦ РАН, а также пыльца, полученная из гербарного материала Института леса КарНЦ РАН. Кроме того, были изучены субрецентные спорово-пыльцевые спектры из поверхностных отложений зоны, затопляемой во время прилива, где зафиксировано значительное количество пыльцевых зерен, принадлежащих *Aster*-type, а также *Plantago maritima*, произрастающих на побережье. Пыльца *Aster*-type включает пыльцу из разных родов, но с другими компонентами палиноспектров по экологии и географическому распространению наиболее совместим только один вид – *Tripolium*

vulgare. Вышесказанное еще раз подтверждает важность изучения поверхностных спорово-пыльцевых спектров и современной растительности изучаемой территории.

Повышение значений пыльцы Poaceae и Cyperaceae, наряду с выклиниванием кривых пыльцы Aster-type, Plantago, Salicornia herbacea, Atriplex nudicalis, продуцируемых облигатными галофитами, произрастающими в литоральной зоне, фиксируют отделение водоема от морского бассейна. Полная изоляция пресноводного водоема, оказавшегося вне зоны штормового заплеска, определяется по появлению пыльцы водных и прибрежно-водных видов, характерных для пресных водоемов, а также спор *Isoëtes* и увеличению количества колоний водорослей *Pediastrum*.

Палинологический анализ находит применение при изучении археологических памятников Карелии.

Археологическая палинология занимается изучением пыльцы и спор в археологических отложениях, а также донных осадках озер, расположенных в пределах археологических объектов. Цель таких исследований – реконструкция растительности и климата в эпохи обитания древнего человека, установление времени возникновения земледелия. Важной ролью палинологического метода является определение возраста геологических отложений археологических объектов.

Применение палинологического анализа позволило определить роль абиотической и биотической среды в освоении берегов Онежского озера человеком на разных этапах голоцена [Девятова, 1986]. Палинологический метод является перспективным направлением для установления времени возникновения земледелия. Основным признаком земледелия является присутствие пыльцы культурных злаков, имеющих более крупные размеры, чем дикорастущие. По морфологическим признакам возможна идентификация пыльцы пшеницы (*Triticum*), ржи (*Secale*), ячменя (*Hordeum*), овса (*Avena sativa*) и некоторых других видов. Другим важным признаком земледелия является появление пыльцы сеgetальных сорняков: гречихи (*Fagopyrum*), василька (*Centaurea cyanus*), (*Convolvulus arvensis*); пыльцы рудеральных растений (*Artemisia*, *Asteraceae*, *Chenopodiaceae*, рода *Urtica*, *Polygonum aviculare*, *Plantago major*), присутствие спор печеночных мхов. Еще одним свидетельством антропогенного вмешательства в природную среду является изменение соотношения пыльцы древесных пород и травянистых растений в пользу последних.

В Юго-Восточной Фенноскандии диагностическим признаком антропогенного влияния служит уменьшение количества пыльцы ели наряду с находками пыльцы *Opagraceae* и угольных частиц. Эти факторы указывают на развитие подсечно-огневого земледелия [Vuorela I., 1973]. В результате совместных работ сотрудников Института

геологии и музея-заповедника «Кижы» было установлено, что начало земледелия островах Кижы и Волкостров, а также в районе оз. Логмозеро имело место около 1100–900 радиоуглеродных лет назад [Демидов и др., 2001; Лаврова и др., 2007]. Также хотелось бы упомянуть, что в северной части Карелии явные признаки человеческой деятельности проявляются в данных пыльцевого анализа донных отложений из оз. Верхнее Куйто и датируются XII веком. Это отражается в уменьшении доли пыльцы ели (*Picea*), вызванном вырубкой елового леса. Начало земледелия датируется по появлению пыльцы ржи (*Secale*) началом XV века. Интенсивное земледелие возникло в начале XIX века, о чем свидетельствует постоянно встречающаяся пыльца ржи (*Secale*) и ячменя (*Hordeum*) [Alenius et al, 2011].

Описанные примеры демонстрируют ценность палинологического метода при изучении озерных отложений, показывая важное значение данных анализа для биостратиграфического расчленения осадков, реконструкции условий палеосреды и антропогенного воздействия на нее.

3.2.2. Диатомовый анализ

Диатомовый анализ – один из биостратиграфических микропалеонтологических и палеобиогеографических методов, основанный на изучении систематического, экологического состава, биогеографии и численности диатомовых водорослей [Геологический..., 1978]. Метод диатомового анализа позволяет уточнить стратиграфические границы палеоклиматических периодов, оценить экологические характеристики в течение развития водоемов, изменение их уровней и т. д.

При восстановлении истории развития водоемов необходимо сделать следующее:

- 1) выяснить систематический состав диатомовых комплексов в стратиграфической последовательности;
- 2) выделить руководящие комплексы диатомей, сформировавшиеся в различных геологических условиях и соответствующих каждому историческому этапу;
- 3) оценить роль важнейших факторов, влияющих на формирование структуры диатомовых комплексов: глубину водоема, условия захоронения диатомей, рН среды, в которой они развивались, галобность, температурный режим водоемов, химизм воды, сапробность и т. д.;
- 4) определить основные характеристики диатомовых комплексов для каждого палеоклиматического периода;
- 5) выделить различные фации отложений (например, переход от морских условий к пресноводным, литоральные и глубоководные фации);

б) при изучении антропогенного воздействия на водные экосистемы необходимо выявить виды-индикаторы, устойчивые к определенным типам загрязнений природных объектов, установить их связь с поступлением химических элементов, влияющих на изменения структуры диатомовых комплексов.

Методика обработки образцов и приготовление препаратов

В Институте геологии КарНЦ РАН в течение многолетних исследований опробована методика подготовки образцов на диатомовый анализ, основанная на общепринятой методике [Диатомовый анализ, 1949–1950; Давыдова, 1985]. Образцы дезинтегрируются в пиррофосфорнокислом натрии с последующей отмывкой от него методом декантации. Дальнейшая обработка и подъем диатомей производится с помощью калиево-кадмиевой тяжелой жидкости. В качестве твердой среды используется анилин-формальдегидная смола (показатель преломления 1,68). Подсчет и определение створок диатомей проводятся по горизонтальному ряду в средней части стекла до 250–500 экземпляров. По возможности створки идентифицируются до вида, разновидности и формы с использованием различной справочной литературы: [Определитель..., 1951], [Баринаова и др., 2006], [Генкал, Трифонова, 2009], [Генкал, Чекрыжева, 2011], [Генкал и др., 2013], [Генкал, Чекрыжева, Комулайнен, 2015], [Куликовский и др., 2016], [Krammer, Lange-Bertalot, 1986, 1991], [Molder, Tynni, 1967–73], [Tynni, 1975–1980] и др.

Для выявления роли отдельных видов и состава доминирующих комплексов диатомей подразделяются на единичные, численность которых в осадках составляет менее 1 % (на диаграммах они обозначаются +), обычные (1–5 %), массовые (более 5 %). Среди последних выделяются доминанты (более 10 %) створок и субдоминанты (от 5 до 10 %.) Результаты диатомового анализа представляются на диатомовых диаграммах.

Идентификация водорослей с помощью светового и сканирующего электронного микроскопов

Определение водорослей и подсчет створок до 250–500 экземпляров проводится в световом микроскопе в средней части стекла. При необходимости образцы можно дополнительно исследовать при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), на котором можно получить более четкие изображения видов по сравнению со световым микроскопом (см. фото видов ниже). По местообитанию диатомей подразделяются на планктонные виды, бентос и обрастателей.

Планктонные (свободно плавающие в толще воды) виды в пресноводных водоемах, в частности в Карелии, представлены, главным образом, центрическими и цилиндрическими формами, некоторые из них показаны на микрофотографиях (рис. 21).

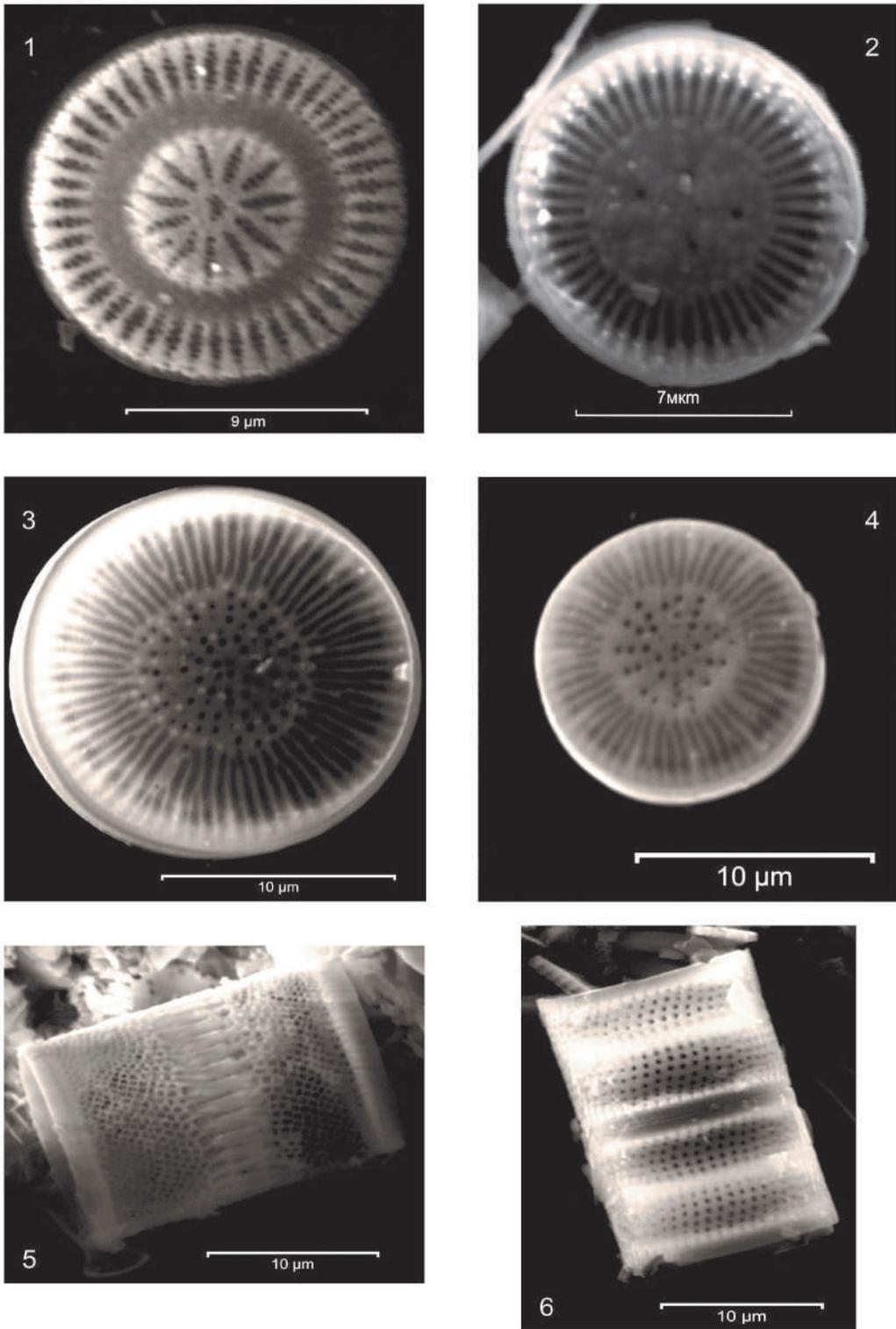


Рис. 21. Электронные микрофотографии планктонных видов (СЭМ):
 1 – *Discotella stelligera*; 2 – *Cyclotella kuetzingiana* var. *kuetzingiana*; 3, 4 – *Handmania comta*;
 5 – *Aulacoseira valida*; 6 – *Aulacoseira* sp.

Обрастатели (или эпифиты) – виды, которые прикрепляются к растениям, корягам, камням, днищам плавательных средств и т. д. Представлены, главным образом, пеннатыми формами, приведенными на рис. 22.

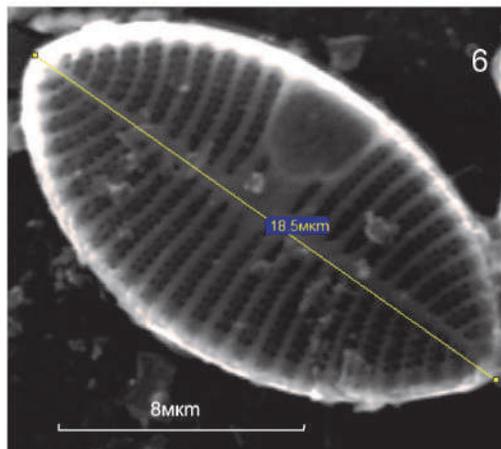
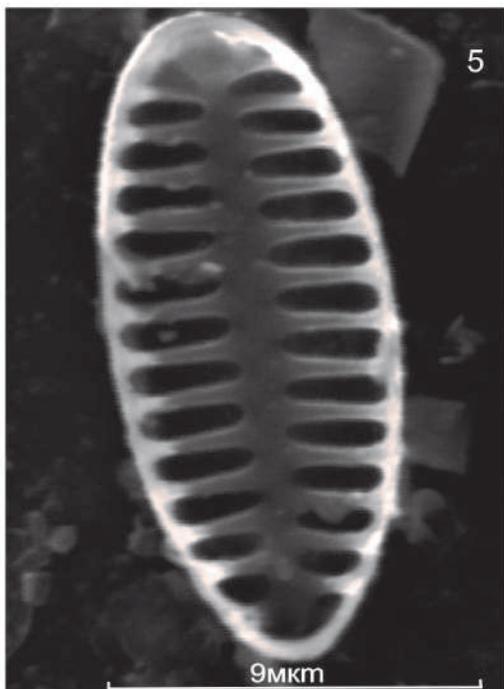
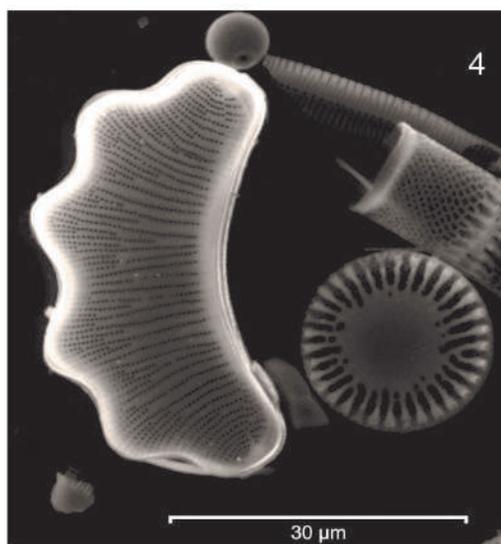
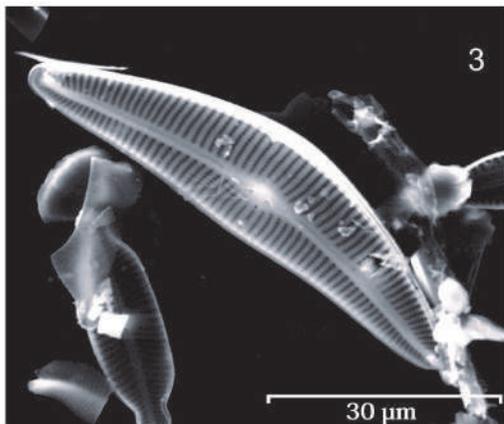
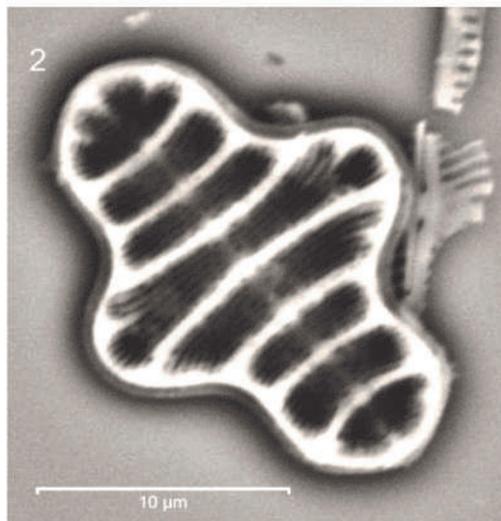
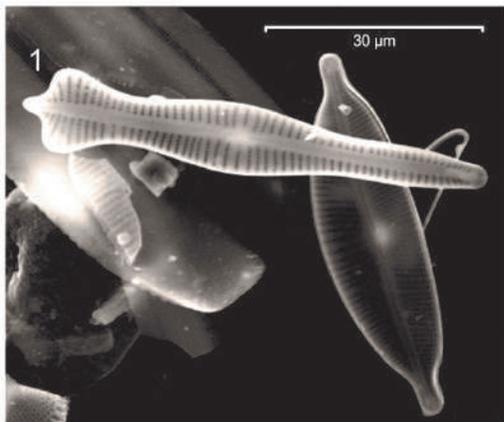


Рис. 22. Электронные микрофотографии видов из обрастаний:
 1 – *Gomphonema acuminatum* var. *coronatum*; *Cymbella naviculiformis*; 2 – *Tetracyclus lacustris*;
 3 – *Cymbella cymbiformis*; 4 – *Eunotia robusta* var. *diadema*; *Cyclotella meneghingiana*; *Aulacoseira italica* var. *valida* 5 – *Martyana martyi*; 6 – *Achnanthes oestrupii*

Донные или бентосные виды обитают на дне водоема, в иле. Представлены также главным образом пеннатыми формами. Некоторые из большого многообразия видов приведены ниже на микрофотографиях СЭМ (рис. 23).

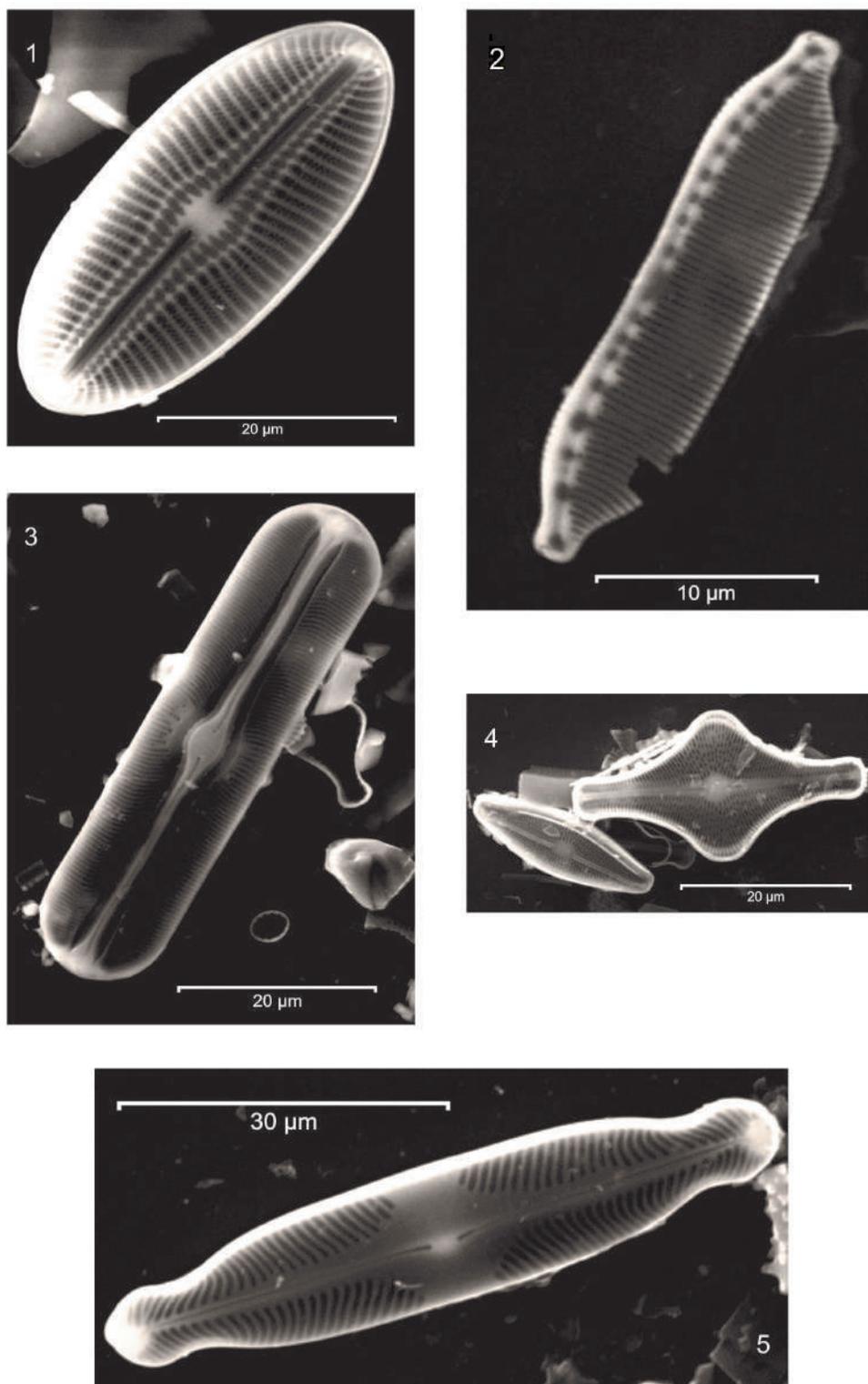


Рис. 23. Электронные микрофотографии донных пресноводных форм (СЭМ):
 1 – *Diploneis smithi*; 2 – *Hantzschia abundans* (Lange-Bertalot); 3 – *Sellaphora pupula* var. *pupula*;
 4 – *Anomoeoneis follis*; 5 – *Pinnularia interrupta*

Результаты идентифицированных видов в каждом образце заносятся в таблицу, в которой приводится список всех выявленных форм по глубинам, их количество, а также характеристики по местообитанию, отношению к рН среды, галобности, биогеографии, сапробности и т. д.

Пример составления такой таблицы приведен ниже (табл. 4).

Таблица 4. Список диатомовых водорослей из разреза (название)

№ п/п	Таксон			авторы	Экология	Галобность	Отношение к рН	Биогеография	Гл. отбора пробы, м
	Achnanthes	Dispar	V. angustissima	(Jasnitsky) Sheshukova	о	гл	алк	б	Число створок
	Aulacoseira	Italica	V. valida	(Grun.) Sim.	п	и	ацф	а	
	Amphora	Ovalis	V. lybica	(Ehren.) Cl.	д	гл	алк	к	

В конце таблицы в примечании приводится расшифровка сокращений. Например:

Примечание: п – планктон, о – обрастатели, д – донные, пг – полигалобы, мз – мезогалобы, гл – галофилы, гб – галофобы, и – индифференты (по отношению к солености), инд – индифференты (по отношению к рН среды), алк – алкалофилы, ац – ацидофилы, а – арктоальпийские, б – бореальные, к – космополиты.

Систематический список диатомовой флоры по одному из озер см.: [Шелехова и др., 2012].

На основании данных таблицы производится количественный подсчет численности видов по местообитанию (в %) и строятся диаграммы их соотношения по разрезу. В качестве примера на рис. 24 показано соотношение видов по местообитанию в донных осадках безымянного озера в районе п. Сумский Посад (Беломорский р-н РК), с абс. отм. уреза воды 24,4 м над уровнем моря (н.у.м.).

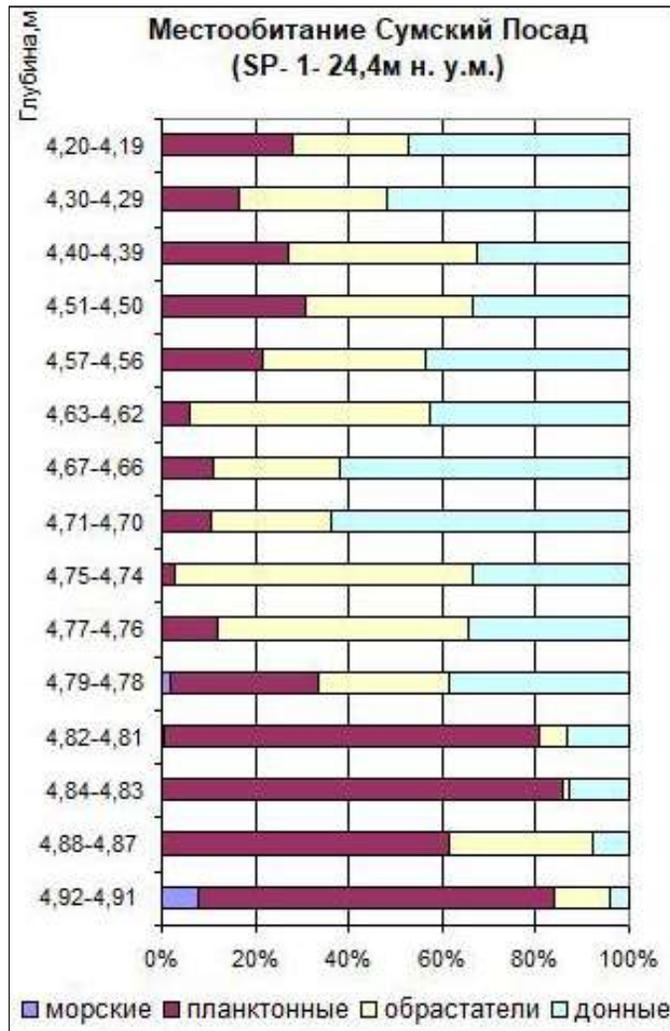


Рис. 24. Соотношение видов по местообитанию (озеро в районе п. Сумский Посад (Беломорский р-н РК), абс. отм. 24,4 м н.у.м.)

Один из важных показателей гидрохимических условий водоема – это рН среды. По отношению к этому показателю в настоящее время предложена следующая система категорий диатомей Хустедта [Hustedt, 1937–39], в которой диатомеи делятся на:

- алкалибионты – развиваются в щелочной среде при рН > 7.5–8;
- алкалифилы (рН ≥ 7);
- индифференты (рН = 7);
- ацидофилы (рН < 7);
- ацидобионты (рН < 5,5).

На основании данных подсчета соотношения видов по условиям рН среды могут быть построены соответствующие диаграммы, а также сделана реконструкция рН среды по формуле [Renberg, Hellberg, 1982]. Примеры таких реконструкций приведены ниже (рис. 25).

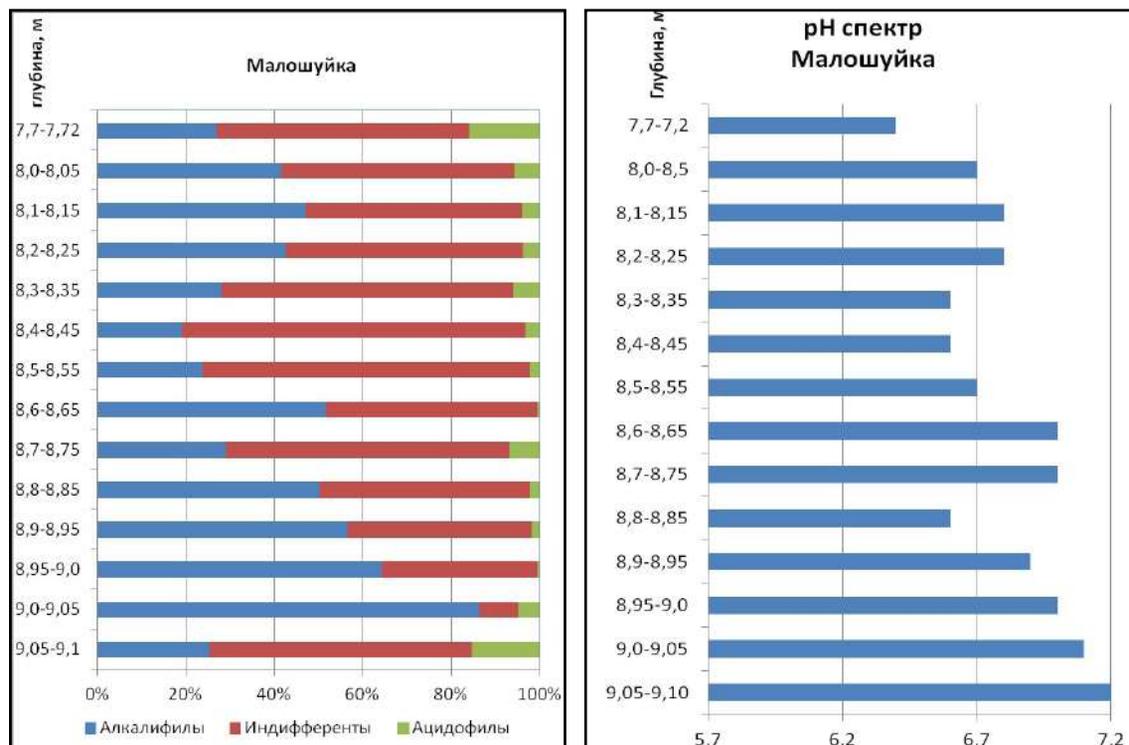


Рис. 25. Соотношение видов диатомей из озера в районе п. Малошуйка Архангельской обл. (абс. отм. 12 м) по условиям рН среды (рН-спектр, подсчитанный по: [Renberg, Hellberg, Т., 1982])

По концентрации солей (рис. 26) в воде диатомей подразделяются на:

полигалобы – обитают в ультрагалинных (пересоленных) водоемах с соленостью выше 40 ‰;

эвгалобы – обитают в океанах и морях с соленостью 30–40 ‰;

мезогалобы – обитают в солоноватых водоемах с соленостью 5–30 ‰;

олигогалобы – обитают в пресных водах с соленостью 0–5 ‰, среди них различают галофильные, индиферентные и галофобные виды:

галофилы – обитают обычно в пресной воде, но наибольшего развития достигают при солености 0,4–0,5 ‰;

индиференты – предпочитают водоемы с минерализацией 0,2–0,3 ‰;

галофобы – обитатели пресных вод с максимальным содержанием солей до 0,02 ‰.

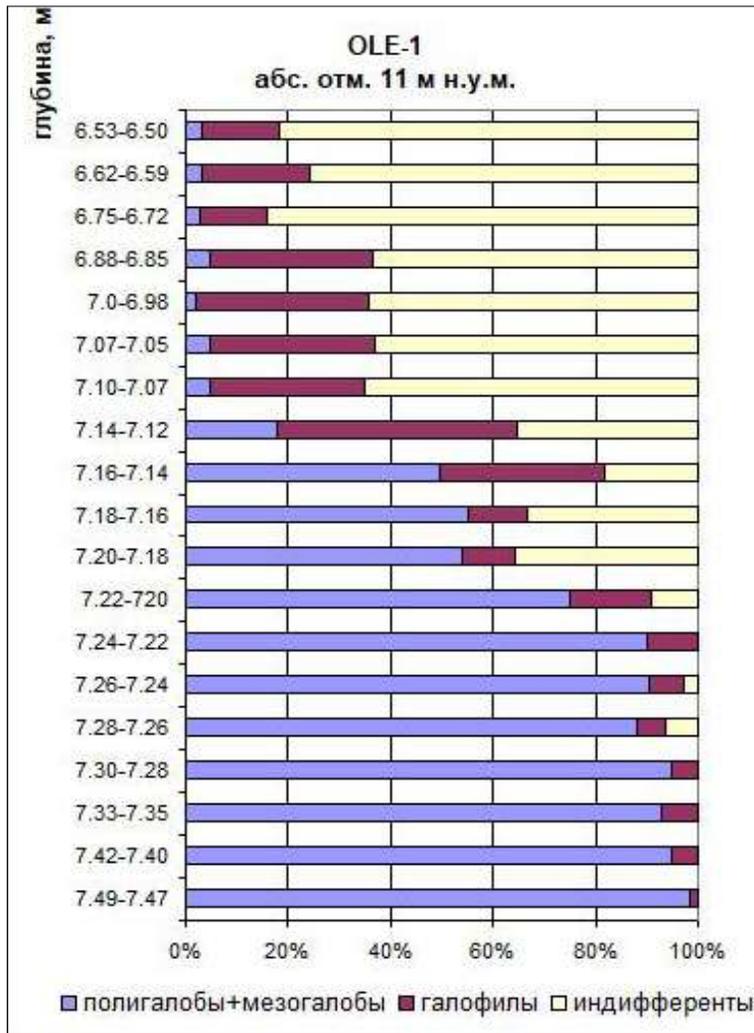


Рис. 26. Соотношение видов по галобности в донных осадках безымянного озера на о. Олений (побережье Белого моря)

По отношению к географическому распространению (биогеография видов, рис. 27) выделяются виды: арктоальпийские, бореальные, космополитные (виды широкого географического распространения).

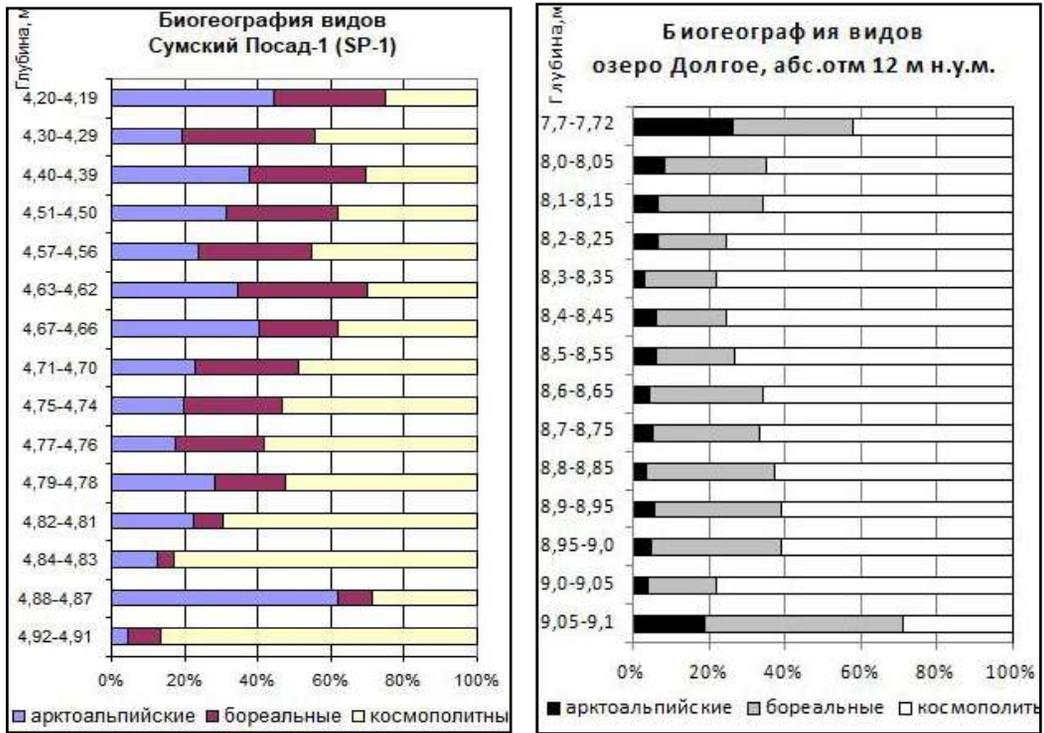


Рис. 27. Биогеография видов в донных осадках озера в районе п. Сумский Посад (Беломорский р-н РК) и оз. Долгое (п. Малошуйка Архангельской обл.)

По количественным соотношениям теплолюбивых и холодоустойчивых видов можно судить об изменении температурных условий развития диатомовой флоры, а значит, косвенно и о потеплении или похолодании. Кроме этого, из списка видов можно выделить виды-биоиндикаторы температурных условий водной среды.

Построение диатомовых диаграмм и палеореконструкции

На диатомовых диаграммах показывается общий состав всей выявленной флоры, подсчитанный в процентном отношении, а также содержание в процентах отдельных видов или родов диатомей. С левой стороны диаграммы помещают колонку с литологией разреза, на ней может быть указано место отбора пробы на радиоуглеродный анализ. Пример диатомовой диаграммы приведен на рис. 28. Далее на примере озера в Лоухском районе РК на г. Нуорунен (абс. отм. 495 м) приводится интерпретация данных диатомового анализа.

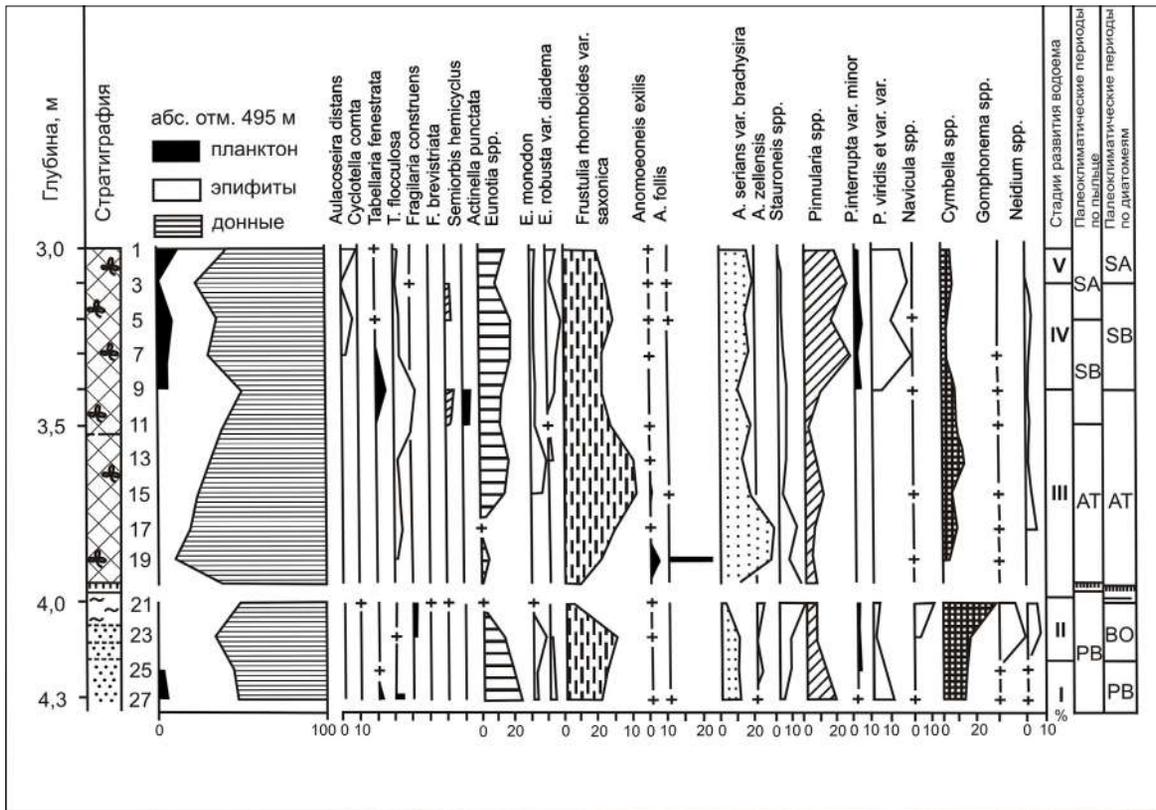


Рис. 28. Диатомовая диаграмма донных отложений из скважины безымянного малого озера на г. Нуорунен (абс. отм. 495 м)

Безымянное озеро расположено на склоне г. Нуорунен, абс. отм. 495 м, в поясе лесотундры. Котловина данного водоема структурно-денудационного типа. Ее происхождение связано с избирательной денудацией среди пород с неоднородным петрографическим составом. Мощность голоценовых осадков, проанализированных методом диатомового анализа, составляет 1,3 м (14 образцов). Выделено пять этапов развития водоема, соответствующих палеоклиматическим периодам голоцена.

I этап (4,30–4,17 м) – накопление мелко-среднезернистых песков с очень низким содержанием створок диатомей и доминированием донных видов. Среди них: *Frustulia rhomboides* var. *saxonica*, *Anomoeoneis seriens* var. *brachysira*, *A. zellensis*, *Stauroneis* spp., *Pinnularia* spp. Группа эпифитов представлена *Cymbella* spp. и *Eunotia* spp. Преобладание галофобов – факт низкой минерализации воды. Такая же картина наблюдается и в отношении pH, которая, судя по приблизительно равным соотношениям ацидофилов и индифферентов, колебалась в пределах от 6 до 6,5. Абсолютное господство арктоальпийских и бореальных видов лишь подтверждает нахождение водоема в зоне лесотундры на высоких абсолютных отметках. Данный этап развития водоема

предположительно относится к пребореальному времени – началу зарождения озера, что вполне согласуется с имеющимися данными спорово-пыльцевого анализа А. М. Колканен.

II этап (4,17–3,97 м) – дальнейшее накопление грубых среднезернистых песков, численность створок диатомей в них низкая. Преобладают донные формы, сокращается участие эпифитов, в которых одни доминанты сменяются другими: *Eunotia* и *Pinnularia*, численность которых снижается, вытесняются диатомеями из родов *Gomphonema*, *Neidium*, *Frustulia*. Такая перестройка стала возможной в связи с некоторым изменением минерализации воды, привносом Са (25–30 мг/л), на что указывает заметное сокращение галофобов с 38 до 24 %, рост кальцифилов. Основные тенденции формирования диатомового комплекса на данном этапе совпадают с имеющимися ранее сведениями, присущими флоре бореального времени, что свидетельствует о низких уровнях водоемов, повышении минерализации за счет трещинных вод и подземного питания, более высокими значениями рН, улучшением температурного режима. Важно отметить, что в осадках пребореала и бореала встречаются единичные экземпляры переотложенных диатомей: *Cyclotella operculata* var. *unipunctata*, *C. operculata* var. *mesoleia*, *Melosira sulcata* var. *biseriata*, *Stephanodiscus* sp. В конце этапа, по-видимому, произошло значительное обмеление водоема, что подтверждается резкой сменой флоры на следующем этапе и отражающей, по всей вероятности, перерыв в осадконакоплении и развитии диатомей. В конце бореала, вероятно, произошел спуск водоема, озеро высохло или промерзло до дна: осадки не накапливались, диатомеи не развивались. Спорово-пыльцевой анализ также свидетельствует о перерыве в осадконакоплении на данном этапе развития озера.

III этап (3,90–3,40 м) – накопление сапропелей. На гл. 3,90 наблюдается максимальная для разреза численность створок, преобладание донных форм (90 %), в которых произошла резкая вспышка в развитии кальцифильных видов *Anomoeoneis follis*, *A. seriens* var. *brachysira*, *Frustulia* spp. Все это свидетельствует о низком уровне водоема (после иссушения – обводнение) и его дистрофном характере. Этот интервал по своим признакам сопоставляется со второй фазой атлантического периода (АТ-2).

В сапропелях (3,70–3,40 м) увеличивается роль эпифитов *Symbella* и *Eunotia*, ярко свидетельствующих об обводнении водоема вследствие потепления и увлажнения климата в атлантикуме. Косвенное доказательство этому – рост космополитов, а также диатомей, предпочитающих кислую среду ($5,5 < \text{pH} < 6$) и указывающих на усиление притока гуминовых веществ. Минерализация воды по сравнению с бореалом снижалась из-за «разбавления» поверхностным стоком. Все эти факторы позволяют отнести данный период развития водоема к АТ-3.

IV этап (3,40–3,20 м) – дальнейшее накопление сапропелей, в которых возрастает содержание створок с 68 до 98 тыс. Преобладают донные виды родов *Pinnularia*, *Anomoeoneis*, *Frustulia*, однако в диатомовом комплексе появляются планктонные – *Aulacoseira distans* var. *lirata*, *Tabellaria fenestrata*, характерные для малых водоемов. Среди донных *Pinnularia* ведущее положение вновь занимают *Pinnularia viridis* et var. var., *P. interrupta* var. *minor* вместе с *Eunotia robusta* var. *diadema*, указывающими на заболачивание и зарастание водоема, низкую минерализацию воды и $5 < \text{pH} < 6$. Диатомовому комплексу присущи черты, характерные для суббореального времени.

V этап (3,20–3,0 м) – в сапропелях наблюдается рост численности створок (см. рис. 19). Продолжают господствовать донные виды *Frustulia rhomboides* var. *saxonica*, *Pinnularia* spp. Однако нарастание болотных эпифитов *Eunotia*, планктонно-литоральных *Aulacoseira distans* и *Tabellaria fenestrata* свидетельствуют об обводненности водоема, а значит, и увлажнении климата. Экологические показатели отражают активизацию процессов вымывания солей и незначительные изменения pH. Все признаки соответствуют диатомовым комплексам субатлантического времени, что хорошо согласуется с палинологическими данными.

Таким образом, на основании интерпретации данных диатомового анализа, сопоставляемых с результатами спорово-пыльцевого анализа, можно проводить палеоклиматические реконструкции.

Необходимо отметить также использование метода диатомового анализа при изучении палеосейсмодислокаций. С помощью метода диатомового анализа в совокупности с другими методами, используемыми для палеоэкологических реконструкций, можно выявлять различные катастрофические процессы (например, землетрясения (палеосейсмодислокации), цунами и т. д.). Хорошим примером является смена диатомовых комплексов после землетрясения на г. Воттоваара на рубеже $8920 \pm 60 \text{ C}^{14}$ лет назад [Шелехова, 1999; Shelekhova, Lavrova, 2019].

Выделение различных фаций отложений

Как известно, диатомеи являются важным показателем фациальных обстановок (озерных, речных, морских и т. д.). Таким образом, с помощью диатомового анализа удается выделить различные фации отложений, например отделить пресноводные отложения от морских. Убедимся в этом на примере исследования донных осадков ряда малых озер на побережье Белого моря (рис. 29), в которых выделены пять фаций и для каждой из них выявлены особенности диатомовой флоры. По литологическим признакам были установлены: осадки фации позднеледникового приледникового водоема (I); осадки фации переходной зоны от пресноводных (приледникового озера) к морским условиям

седиментации (II); осадки фации, соответствующей морским условиям (III); осадки фации переходной зоны от морских к озерным условиям (IV); осадки фации пресноводного озера (V) [Колька и др., 2005].

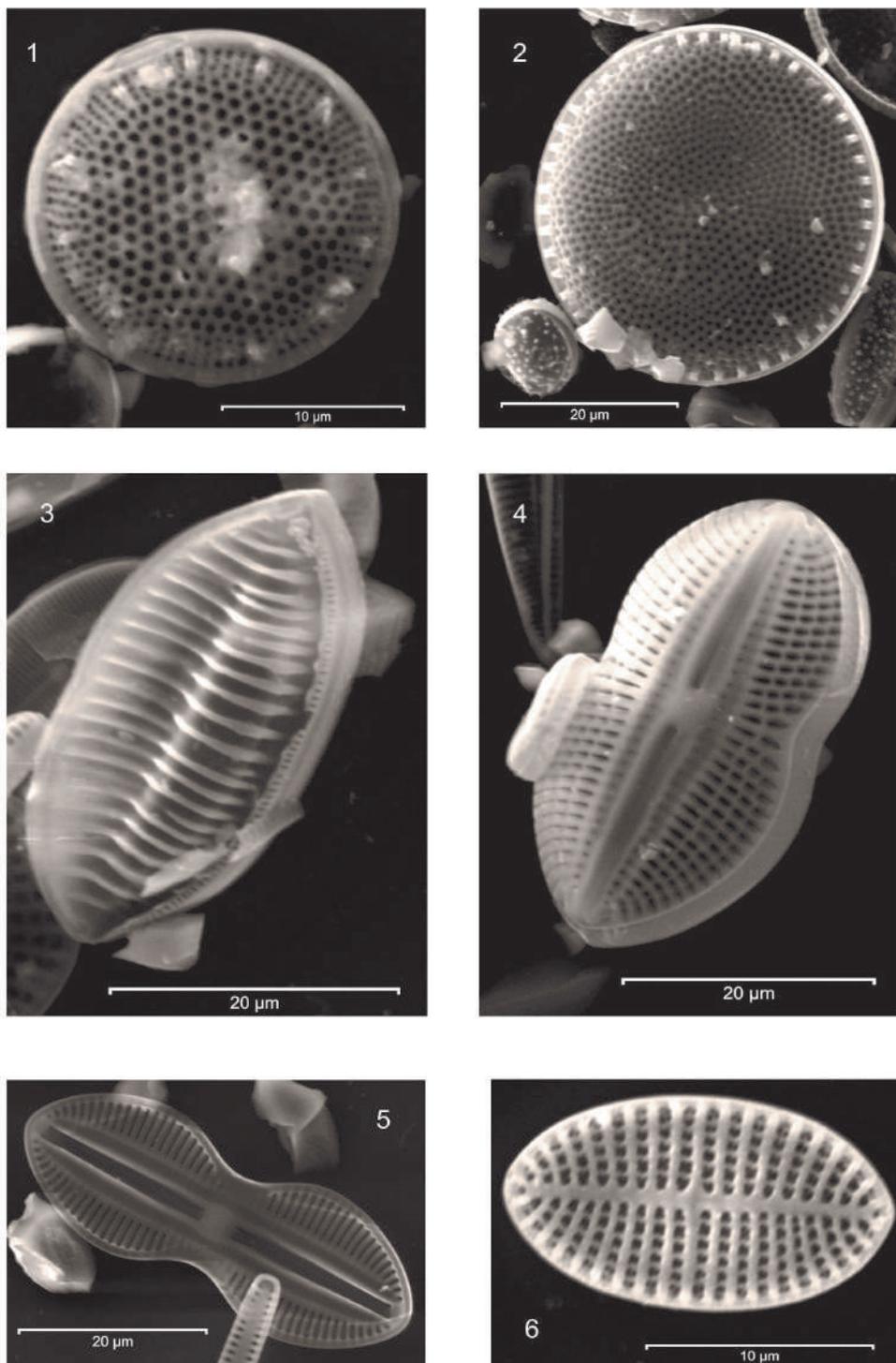


Рис. 29. Типичные представители морской диатомовой флоры в донных осадках озер на побережье Белого моря (СЭМ):
1 – *Thalassiosira exentrica*; 2 – *Thalassiosira* sp.; 3 – *Nitzschia* sp.; 4 – *Diploneis bombus* (?);
5 – *Diploneis subcincta*; 6 – *Cocconeis scutellum*

Однако в исследованных районах разрезы имеют значительные литологические и стратиграфические несогласия, и часто только диатомовый анализ позволяет точно определить переход от одних условий седиментации к другим.

Особый интерес представляют морские и переходные отложения с различным процентным содержанием морских и солоноватоводных видов диатомей, по которым и устанавливается принадлежность осадков к той или иной фации.

Фация I. Приледниковые отложения представлены неслоистой, неяснослоистой или ленточной глиной, слоистым разнозернистым песком. Диатомовый комплекс в них отличается содержанием единичных мелких обломков морских видов (*Caloneis schrödery* Hust., *Coscinodiscus* sp., *Chaetoceros holsaticus* (Schütt.), *Navicula* sp., *Pinnularia quadratarea* A.S.) и в целом отражает либо чисто пресноводные, либо слабо осолоненные условия седиментации осадков. Такие комплексы выявлены в донных отложениях озер в районе п. Чупа (Лоухский р-н РК) и п. Кузема (Кемский р-н РК). В районе п. Энгозеро (Лоухский р-н РК) осадки данной фации содержат единичные, вероятно, переотложенные створки пресноводных (*Cyclotella kuetzingiana* var. *radiosa*, *Aulacoseira distans*) и морских (*Thalassiosira exentrica*) диатомовых водорослей. Очень часто ископаемая диатомовая флора в приледниковых отложениях отсутствует.

Фация II. Осадки фации переходной зоны от пресноводных (приледникового озера) к морским условиям седиментации представлены в разрезах зеленоватым песком или алевроитом с коричневым до черного органическим материалом. Осадки содержат большое количество обломков створок диатомовых очень плохой сохранности. Среди них главенствующее положение занимают **галофильные** виды: *Gyrosigma* Hass sp., *Epithemia zebra* var. *saxonica* Grün., *Achnanthes conspicua* A. Mayer, *Fragilaria subsalina* (Grün.) L.-B., *Anomoeoneis sphaeropora* var. *sculpta* (O. Müll). Единичные морские полигалобы могут быть представлены *Chaetoceros* Ehr. sp., *Glyphodesmis distans* (Greg.) Grün., *Thalassionema nitzschioides* Grün., *Navicula humerosa* Breb., *Nitzschia grunovii* (Cl.) Hasle, *Nitzschia obtusa* W. Sm., а мезогалобы – *Mastogloia elliptica* (Ag.) Cl., *Mastogloia grevillei* W. Sm., *M. smithi* var. *lacustris* Grün., *Diploneis interrupta* (Kütz.) Cl.

Фация III. Морские отложения представлены как минеральным (разнозернистым песком), так и органическим материалом (отдельные раковины и их фрагменты в алевроито-песчаных осадках) и содержат морскую и солоноватоводную диатомовую флору, процентное соотношение которой колеблется в широких пределах. Сочетание полигалобов, мезогалобов, галофилов и индифферентов для каждого временного палеоклиматического периода голоцена различается и зависит как от климатических, геолого-геоморфологических, так и от топоэдафических факторов. Среди полигалобов

доминируют *Thalassiosira* Cl. sp. (*Thalassiosira exentrica*), *Diploneis* Ehr. sp., в небольшом количестве присутствуют *Navicula ammophila* Grün., *N. palpebralis* Breb., *N. bottnica* Grün. Мезогалобы более разнообразны, среди них выделяются: *Opephora marina* (Greg.) Petit, *Mastogloia grevillei* W. Smith, *M. smithi* Thwaites, *M. smithi* var. *lacustris* Grün., *M. elliptica* (Ag.) Cl., *M. pumilla* (Grün) Cl., *Amphora* sp. (*Amphora proteus*), *Caloneis* sp., *Coscinodiscus* sp., *Navicula scopulorum*, *Navicula rostellata* Kütz., *Navicula rhombica* Greg., *Navicula costulata*, *Nitzschia trybrionella* Hantzsch., *Nitzschia commutata* и др. Наиболее типичные галофилы в данном типе осадков: *Epithemia sorex* Kütz., *Navicula rhyncocephala* Kütz., *N. hungarica* Grunov, *Nitzschia* Hass. sp., *Rhopalodia gibba* var. *ventricosa* (Ehr.) (Kütz.), *Rhoicosphaenia curvata* (Kütz.), Grun. Пресноводные индифференты в морских отложениях немногочисленны. Среди них можно выделить *Amphora ovalis* Kütz., *Cocconeis placentula* Ehren., *Fragilaria* sp., *Tabellaria flocculosa* (Roth.) Kütz. и др.

Фация VI. Осадки фации переходной зоны от морских отложений к озерным представлены неслоистой, неяснослоистой гиттией, алевролитистой гиттией или алевролитом. Основные доминанты переходной зоны: мезогалобы – *Diploneis smithi* (Breb.) Cl., *Diploneis smithi* var. *pumilla* (Grun.) Hust., *Mastogloia elliptica* (Ag.) Cl., *Mastogloia smithi* Thwaites, галофилы – *Cocconeis placentula* Ehr., *Cyclotella meneghingiana* Kütz., *Epithemia sorex* Kütz., *Navicula rhyncocephala* Kütz., *Navicula cryptocephala* Kütz., *Sellaphora pupula* (Kütz.) Mer., *Navicula radiosa* Kütz., *Gyrosigma* sp.

Фация V. Озерные осадки представлены сапропелями (гиттией) неяснослоистыми с растительными остатками, в которых содержится до 10 % галофилов с единичными поли- и мезогалобами: *Thalassiosira* Cl. sp., *Coscinodiscus* sp., *Mastogloia* sp. Пресноводный комплекс довольно богат и разнообразен и включает планктонные виды родов *Aulacoseira* (*Aulacoseira italica*, *A. islandica*, *A. distans*, *A. ambigua*), *Cyclotella*, формы обрастаний (эпифиты): *Fragilaria*, (*Fragilaria construens*, *F. brevistriata*), *Tetracyclus*, *Cymbella*, *Tabellaria*, *Achnanthes* sp., донные: *Navicula*, *Pinnularia* и др. По их соотношениям и смене комплексов можно четко выделить основные этапы развития водоемов, а также доминирующие виды для каждого палеоклиматического периода, а в сочетании с другими микропалеонтологическими методами установить относительный возраст осадков.

Выявление видов-индикаторов антропогенного воздействия на природную среду

Диатомеи являются чуткими индикаторами степени загрязнения вод, так как при сильном органическом загрязнении одни виды погибают, а другие, наоборот, активно поглощают органические вещества и усиленно развиваются. Выяснение этих видов-

индикаторов загрязнения дает возможность установить скорость данных процессов и негативное воздействие на экосистемы в целом.

В последние годы многими учеными проводятся исследования по выявлению в составе диатомовых комплексов видов, реагирующих на загрязнение природной среды, устойчивых к различным антропогенным воздействиям. Подобные работы ведутся и в Карелии. На примере урбанизированных территорий, в частности г. Петрозаводска, в устье р. Лососинки были выявлены диатомовые, устойчивые к определенным видам загрязнений, в том числе тяжелыми металлами. Установлено, что наиболее чувствительными к изменениям условий обитания являются планктонные и планктонно-литоральные виды диатомей (*Aulacoseira lyrata f. lacustris*, *Surirella sp.*, *Nitzschia sp.* и др.) Численность отдельных видов значительно сокращается при загрязнении вод, превышающих ПДК Zn, Cu, Co. Результаты этих исследований приводятся в работах: [Слуковский, Шелехова, 2013; Шелехова, Слуковский, 2013; Шелехова, Крутских, 2013; Рыбаков, Шелехова, 2014; Шелехова, Слуковский, 2019].

Выделение различных типов диатомитов

Диатомиты Карелии – осадочные горные породы, сложенные створками диатомовых водорослей, накапливающихся на дне озер в голоцене. Анализ многочисленных образцов из различных месторождений диатомитов позволил выявить породообразующие виды (доминанты и субдоминанты) и выделить по ним пять типов диатомитов.

Среди главенствующих форм выделяются эпифиты (виды обрастаний) и донные, планктонные представлены только родом *Aulacoseira sp.* Видовой состав диатомитов довольно разнообразен и в целом насчитывает около 230 видов, разновидностей и форм, однако породообразующими являются только представители 12 родов и 32 видов [Демидов, Шелехова, 2006]. Большинство породообразующих видов – это холодолюбивые арктоальпийские и бореальные формы и, как правило, галофобы и индифференты, развивающиеся в воде с незначительным содержанием солей, из которых 20 являются «сквозными», то есть встречаются во всех типах диатомитов [Демидов, Шелехова, 2006].

I тип

Наиболее часто встречаются диатомиты, выявленные в разных районах Карелии с породообразующими планктонными рода *Aulacoseira sp.*, и субдоминантами эпифитами и донными *Tetracyclus lacustris*, *Fragilaria spp.*, *Eunotia spp.*, *Tabellaria spp.*, *Anomoeoneis spp.*, *Frustulia spp.* Они формируются в относительно глубоководных условиях малых водоемов при рН 6,1–7,1, имеют грубый толстостенный панцирь цилиндрической дисковидной формы. Характеризуются высоким содержанием двуоксида кремния (63,8–

95 %), значительным количеством створок в грамме осадка (до 500 млн и более), хорошей сохранностью, самым высоким удельным весом и удельной поверхностью, что свидетельствует о высоком качестве этого типа диатомитов (рис. 30)

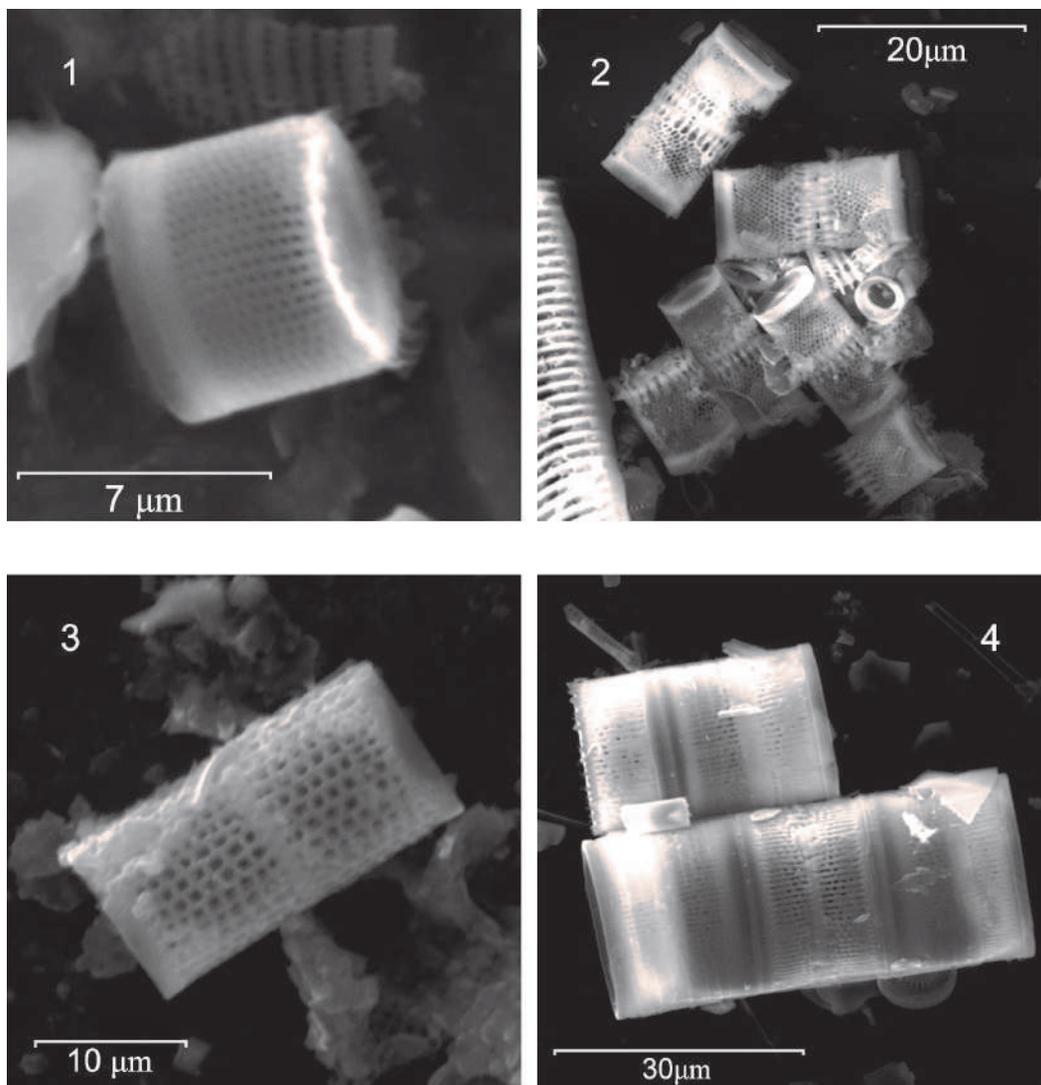


Рис. 30. Породообразующие виды диатомита I типа:
1 – *Aulacoseira* sp.; 2 – *Aulacoseira italica* var. *valida*; 3 – *Aulacoseira granulata*;
4 – *Aulacoseira lyrata* f. *lacustris*

II тип

II тип – диатомиты, сложенные створками литоральных видов рода *Fragilaria sensu lato*, обитающих в мелководной зоне водоемов на погруженных в воду растениях и камнях. Данный тип диатомитов широко распространен в северной, западной и восточной Карелии. Содержание двуоксида кремния в них составляет в среднем от 64 до 75 %. Массовое развитие породообразующих диатомей происходит при pH 7–7,5. В диатомитах содержится большое количество обломков, что значительно ухудшает их качество (рис. 31).

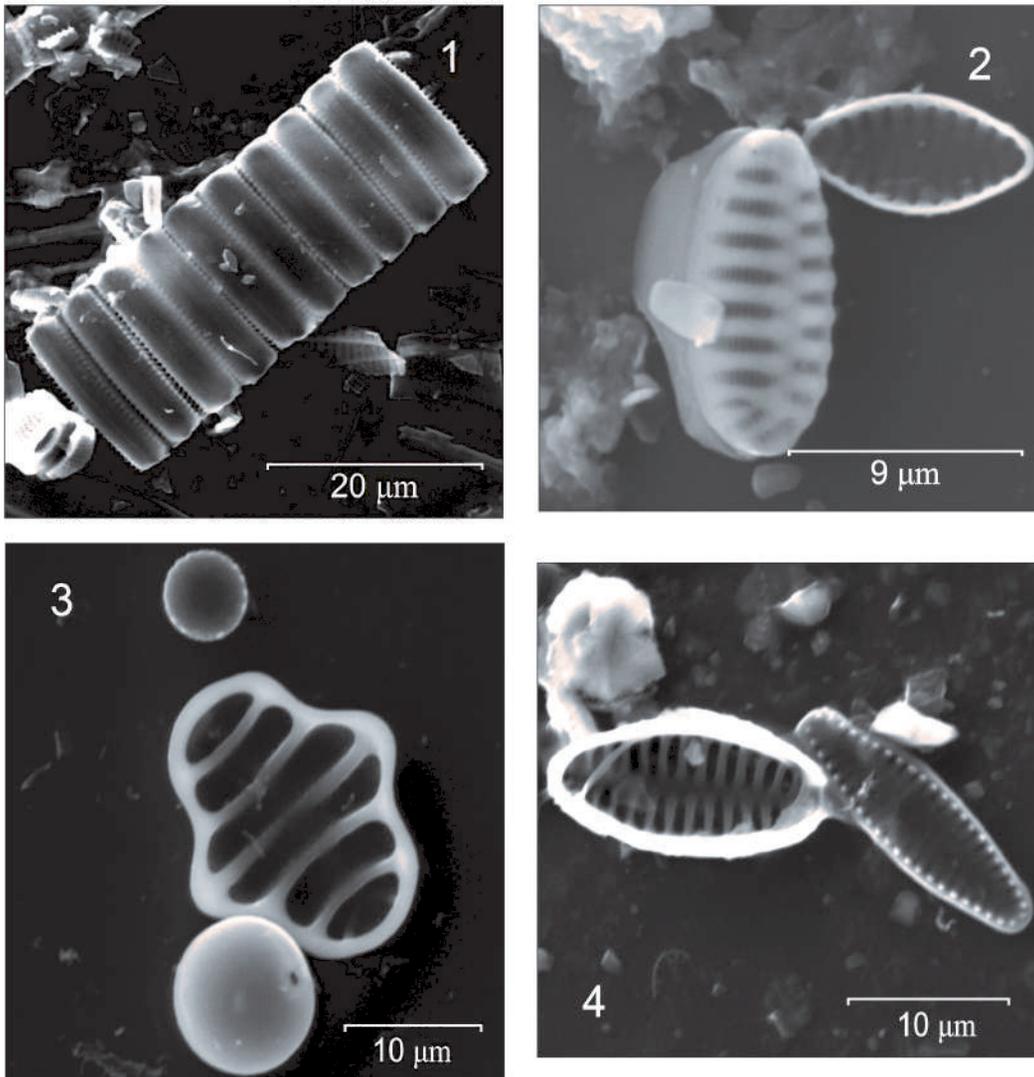


Рис. 31. Диатомиты II типа:

1 – *Fragilaria (Staurosira) brevistriata*; 2 – *Staurosira pinnata*, *Staurosira venter*; 3 – *Tetracyclus lacustris*;
4 – *Fragilaria (Staurosira) brevistriata*, *Staurosira pinnata*

III тип

III (смешанный) тип представлен планктонными видами цилиндрической формы, донными и обрастателями. Активная реакция воды, в которой развивается комплекс диатомей этого типа, колеблется от 5,3 до 7. Содержание двуокиси кремния – от 50 до 88,25 % (рис. 32).

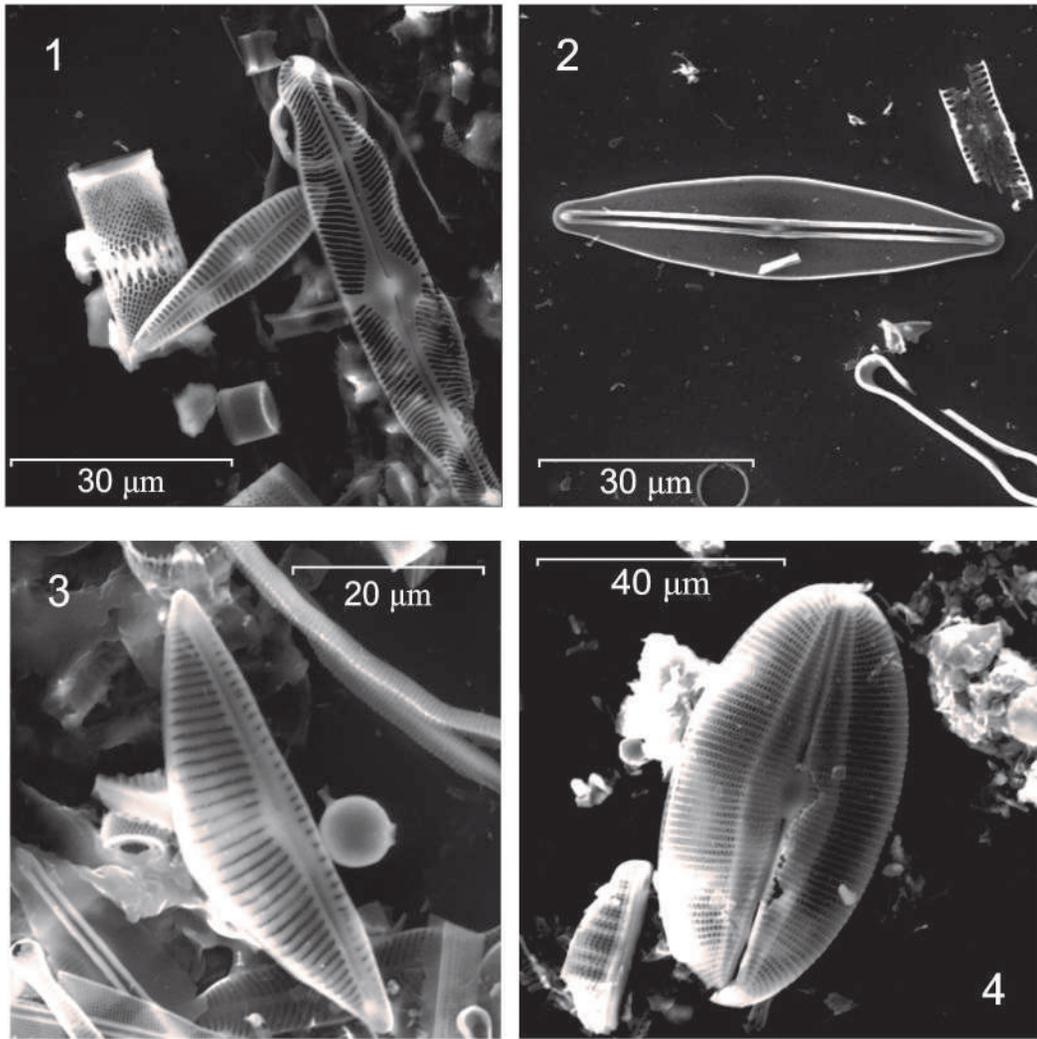


Рис. 32. Диатомиты III типа:

1 – *Aulacoseira italica* var. *valida*, *Gomphonema* sp., *Pinnularia interrupta*; 2 – *Frustulia saxonica*;
3 – *Cymbella turgida*; 4 – *Diploneis finnica*

IV тип

IV тип диатомитов (рис. 33) представляет собой сочетание породообразующих донных форм родов *Anomoeoneis* sp., *Frustulia* sp., *Pinnularia* sp., *Navicula* sp. с субдоминантами из обрастаний *Cymbella* sp., *Tabellaria flocculosa*+*fenestrata*. Содержание двуоксида кремния в них составляет от 62 до 95 %, развиваются при средних значениях pH 6,8, встречаются в северной и западной Карелии.

Вторая разновидность этого типа – сочетание породообразующих донных рода *Anomoeoneis* sp. и планктонных рода *Aulacoseira* sp., с субдоминантами *Tabellaria flocculosa* + *fenestrata*, массовое развитие происходит при pH около 5,5.

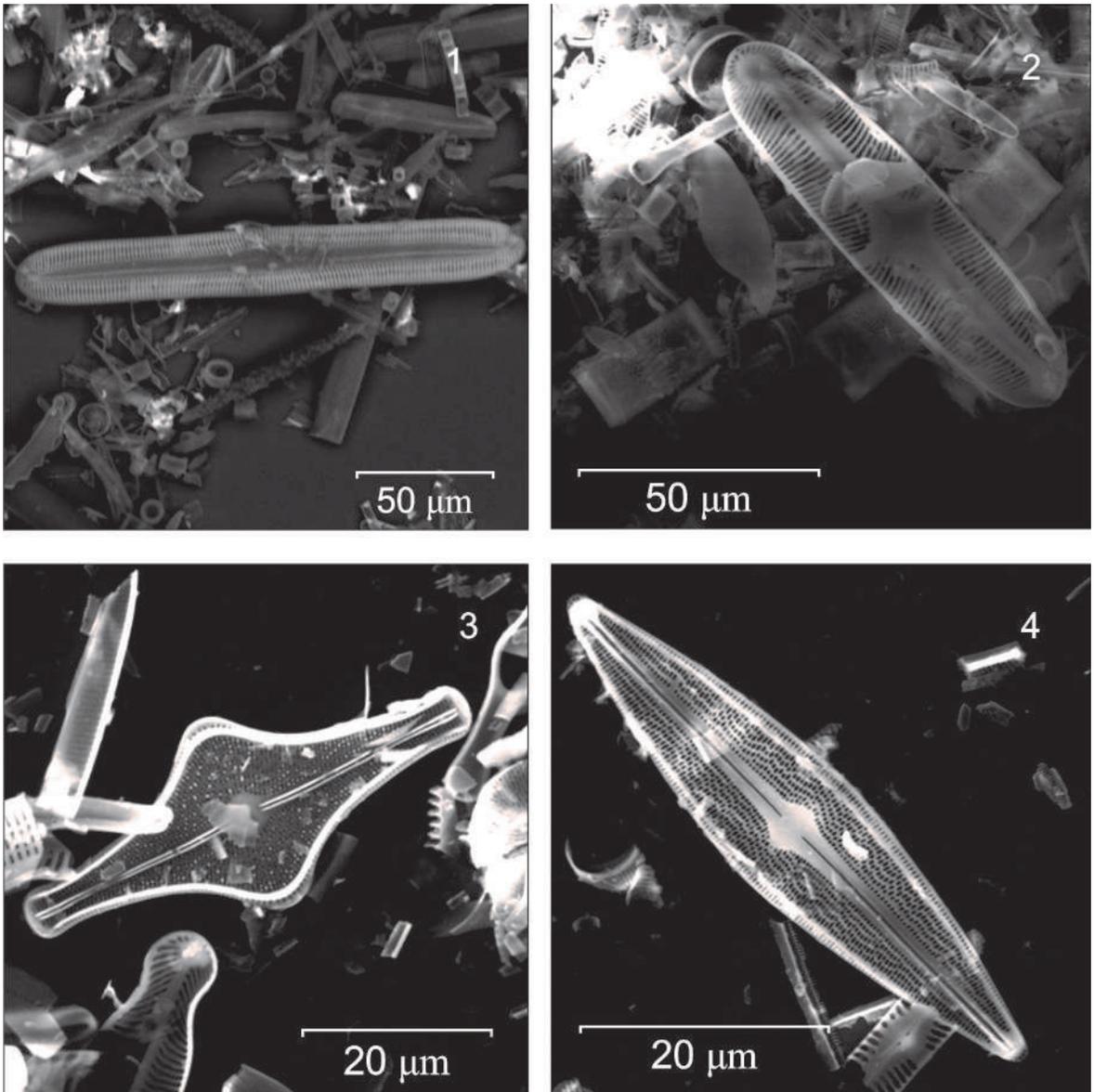


Рис. 33. Диатомиты IV типа:
 1, 2 – *Pinnularia* sp., 3 – *Anomoeoneis follies*; 4 – *Anomoeoneis serians*

V тип

V тип совершенно отличается от предыдущих по породообразующему составу. Доминантами являются типичные болотные формы рода *Eunotia*, развивающиеся на погруженных в воду растениях. Диатомовый комплекс развивается при pH среды не более 6,5. Такие диатомиты встречается в озерах западной Карелии, в Медвежьегорском районе. Содержание двуокиси кремния в них колеблется от 64,9 до 78,8 % (рис. 34).

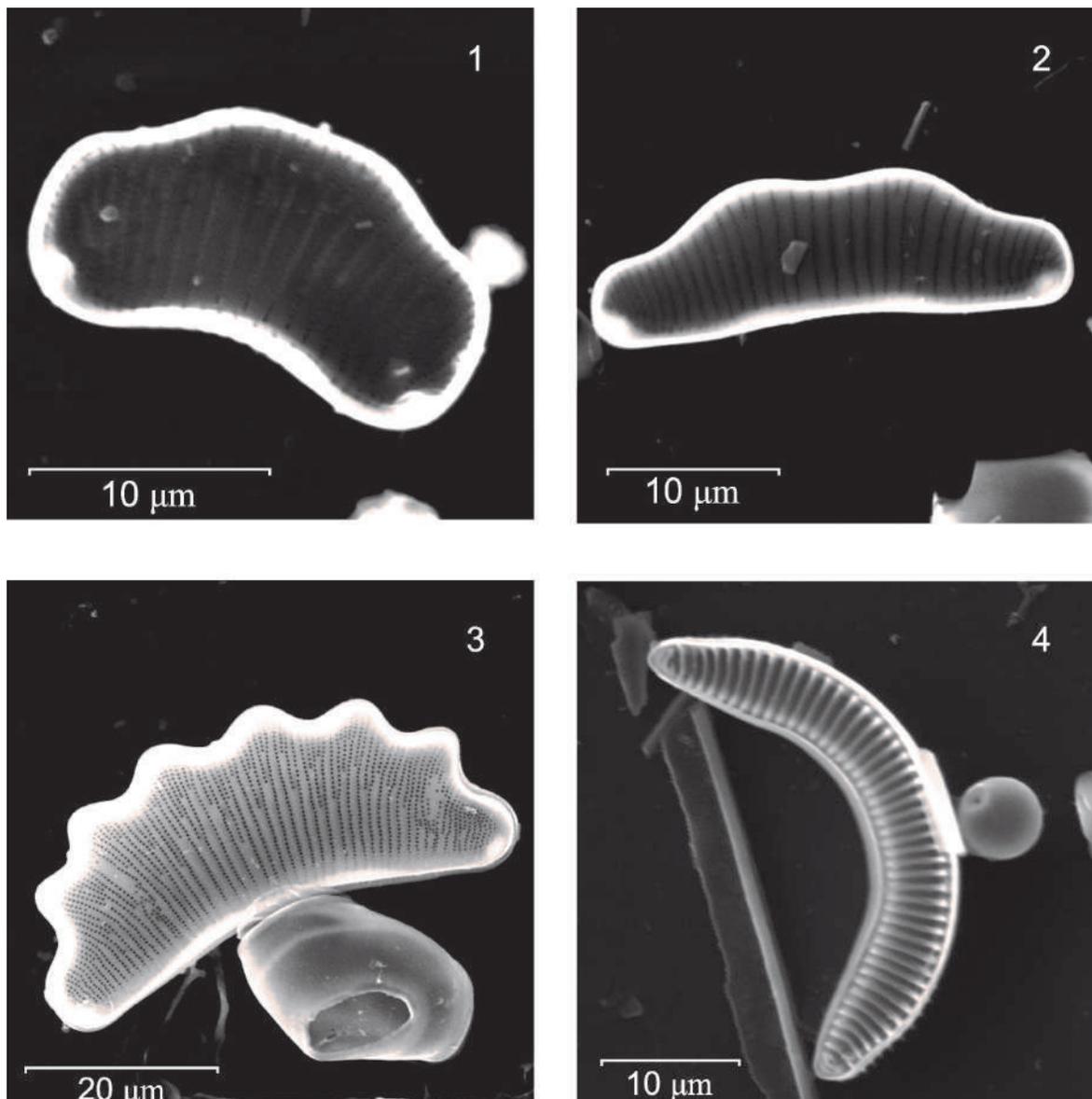


Рис. 34. Породообразующие виды диатомитов V типа:
 1 – *Eunotia praerupta* var. *bidens*; 2 – *Eunotia bigibba*; 3 – *Eunotia robusta* var. *diadema*;
 4 – *Amphicmpha* (*Semiorbis*) *hemicyclus*

Таким образом, реконструкция палеогеографических условий прошлых эпох особенно в их хронологической последовательности позволяет полнее понять закономерности развития природы в настоящем и дать обоснованный прогноз их развития в будущем. В этой связи использование метода диатомового анализа для палеогеографических и палеоэкологических реконструкций приобретает не только научное, но и большое практическое значение. Выявление диатомей – индикаторов антропогенного воздействия на лимносистемы может быть включено в программы экологического мониторинга окружающей среды в регионах с высокой техногенной нагрузкой.

3.3. Экологическая интерпретация геохимических данных

Очевидно, что сами по себе концентрации различных химических элементов, относимых к категории загрязнителей, в донных отложениях озер не могут давать полной картины экологического состояния изучаемых водных экосистем. Однако существуют подходы, позволяющие провести интерпретацию «голых» геохимических данных с учетом фоновых или нормативных значений, обычно известных исследователям заранее. Например, такие подходы применяются при расчете коэффициентов и индексов. Рассмотрим некоторые из них.

Коэффициент обогащения, или коэффициент концентрации, рассчитывается по формуле

$$K_c = C/B$$

где C – концентрация тяжелого металла в исследуемой пробе или слое донных отложений, B – фоновая концентрация исследуемого элемента.

Экологическая интерпретация в данном случае заключается в ранжировании полученных значений K_c от самого большого значения до минимального, что дает понимание о величине накопления того или иного загрязнителя и, следовательно, его потенциально опасности.

Коэффициент геоаккумуляции I_{geo} рассчитывается по формуле

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C}{1.5 \times B} \right)$$

где C – концентрация тяжелого металла в исследуемой пробе или слое донных отложений, B – фоновая концентрация исследуемого элемента [Müller, 1979].

В зависимости от величины индекса уровень загрязнения озера тем или иным металлом может быть оценен по следующей шкале: незагрязненный водоем ($I_{geo} \leq 0$); уровень от незагрязненного до умеренно загрязненного ($0 < I_{geo} < 1$); умеренно загрязненный водоем ($1 < I_{geo} < 2$); уровень от умеренного до сильного загрязнения ($2 < I_{geo} < 3$); сильно загрязненный водоем ($3 < I_{geo} < 4$); уровень от сильного до экстремального загрязнения ($4 < I_{geo} < 5$); экстремально загрязненный водоем ($I_{geo} > 5$).

Пример использования индекса приведен на рис. 35. Авторами [Slukovskii et al., 2020] был оценен уровень загрязнения оз. Юконлампи, расположенного в юго-западной части Карелии, на основе анализа поведения тяжелых металлов в донных отложениях водоема.

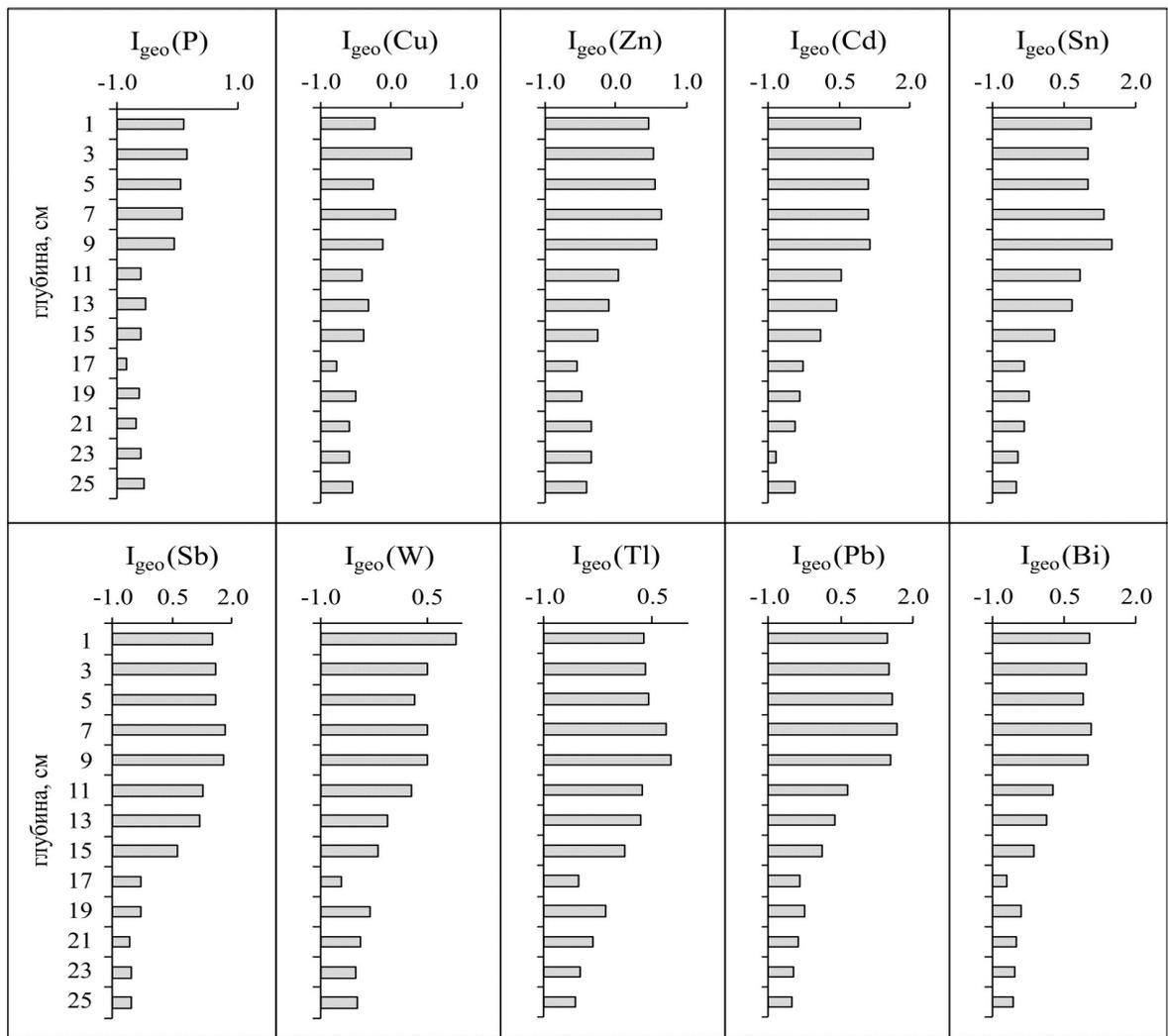


Рис. 35. Значения индекса I_{geo} для тяжелых металлов в различных слоях современных отложений оз. Юконлампи (Лахденпохский р-н РК) [Slukovskii et al., 2020]

Суммарный показатель загрязнения Z_c рассчитывается по формуле

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1)$$

где K_c – коэффициент концентрации, n – число металлов, содержание которых превышает фоновые значения в 1.5 и более раз [Саэт и др., 1990].

Однако чаще всего исследователь сам определяет, сколько металлов будет использовано при расчете Z_c . В зависимости от величины индекса Z_c уровень загрязнения может быть оценен как слабый ($Z_c \leq 10$), средний ($10 < Z_c \leq 30$), сильный ($30 < Z_c \leq 100$) и очень сильный ($Z_c > 100$).

Пример использования этого показателя приведен на рис. 36. Это очень хороший интегральный показатель, который позволяет оценить нагрузку на озерную экосистему с учетом сразу всех изученных загрязнителей. Однако в последние годы суммарный

показатель загрязнения Z_c используется все реже, уступая место другим интегральным методам оценки загрязнения донных отложений.

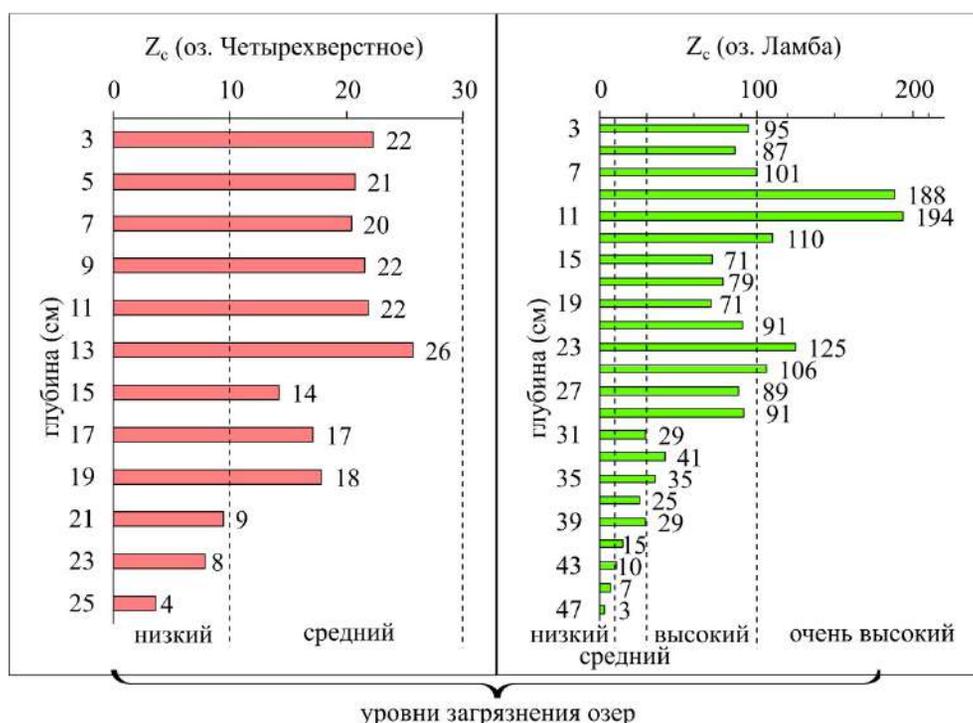


Рис. 36. Значения суммарного показателя загрязнения (Z_c) в разных слоях современных донных озера г. Петрозаводска с указанием уровней загрязнения [Слуковский, 2020]

Индекс антропогенной нагрузки PLI (Pollution Load Index) рассчитывается по формуле

$$PLI = (CF_1 * CF_2 * \dots * CF_n)^{1/n},$$

где CF – это коэффициент концентрации, n – число металлов, взятых для расчета индекса [Tomlinson et al., 1980].

В зависимости от величины индекса PLI уровень загрязнения может быть оценен как низкий ($PLI \leq 1$), умеренный ($1 < PLI \leq 2$), высокий ($2 < PLI \leq 3$) и экстремально высокий ($PLI > 3$). Индекс PLI наиболее распространен в англоязычной научной литературе, поэтому при публикации статей в международных журналах предпочтительнее использовать индекс PLI, чем Z_c , который используется в основном исследователями из России и стран бывшего СССР.

Коэффициент биодоступности, или коэффициент подвижности элемента, рассчитывается по формуле

$$K_{\text{подв.}} = \frac{100 * C_{\text{подв.}}}{C_{\text{вал.}}}$$

где $C_{\text{подв.}}$ – концентрация химического элемента в исследуемой пробе или слое донных отложений в биодоступной или подвижной форме, полученной в результате обработки образца ацетатно-аммонийным буфером $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$ [Tessier et al., 1979] или 1М раствором MgCl_2 [Ладонин, Карпухин, 2003], $C_{\text{вал.}}$ – валовая концентрация того же элемента. Выражается в процентах.

К сожалению, в России до сих пор не разработаны предельно-допустимые концентрации (ПДК) тяжелых металлов в донных отложениях водных объектов, как это сделано для почв или воды. В этой связи стоит отметить, что некоторые исследователи иногда сравнивают получаемые концентрации тяжелых металлов в донных отложениях озер с почвенным или водным ПДК, подставляя их значения в вышеописанные формулы вместо фоновых значений. Хочется отметить, что почвы, вода и донные отложения – это хоть и близкие по генезису и некоторым другим характеристикам субстанции, но все-таки сильно отличающиеся друг от друга, поэтому использование ПДК почв и ПДК воды для экологической интерпретации геохимических данных, полученных в результате исследования донных отложений озер, весьма некорректно.

Для нормирования концентраций химических элементов в донных отложениях водных объектов более допустимо использование среднего состава континентальной земной коры, среднего состава осадочных пород или среднего состава горных пород исследуемой территории [Ярошевский, 2004; Wedepohl, 1995; Страховенко, 2011]. При изучении концентраций редкоземельных элементов в донных отложениях озер можно применять популярный в геологии метод нормирования по хондриту. Однако наиболее перспективным является расчет собственных фоновых концентраций химических элементов для донных отложений малых озер изучаемого района [Tulmann et al., 2011]. Учитывая, что разные районы нашей планеты могут иметь различные геологические условия, то и фоновые концентрации химических элементов в разных средах будут отличаться. В этой связи важна оценка фоновых концентраций именно той территории, которую исследователю предстоит изучать.

Кроме применения различных коэффициентов и индексов, существует и чисто биологический подход для экологической интерпретации геохимических данных. Он может быть выражен, например, в бентосном анализе изучаемых донных отложений, когда исследуются численность и состав всех живых организмов, населяющих озерные осадки. Также он может быть выражен в спорово-пыльцевом и диатомовом анализе проб из колонок современных донных отложений (эти методы описаны в данной монографии). Сопоставление биологических данных, представленных выше, с геохимическими данными, в первую очередь с уровнем накопления тяжелых металлов в осадках озер,

может дать более полную картину изменений, происходящих и происходивших в прошлом в самом водоеме и на территории его водосбора.

3.4. К вопросу о фоновых концентрациях тяжелых металлов

В донных отложениях

Анализ фоновых концентраций химических элементов, в том числе тех, которые относятся к разряду загрязнителей окружающей среды, – важная задача в ходе геоэкологических исследований [Даувальтер, 2012]. В «классической» геологии усредненные или эталонные концентрации химических элементов в основном используются для нормирования концентраций этих же элементов в изучаемых объектах, в первую очередь в горных породах и осадках [Интерпретация..., 2001]. Примером являются кларковые числа (кларки элементов или просто «кларки»), названные так в честь американского геохимика Ф. У. Кларка (1847–1931) и выражающие среднее содержание химических элементов в земной коре, гидросфере, Земле, космических телах, геохимических или космохимических системах и т. д., по отношению к общей массе этой системы. Нормирование по кларкам позволяет выявить аномалии тех или иных химических элементов, что важно при поисках и промышленной оценке месторождений полезных ископаемых (прикладная задача), а также при выявлении общих закономерностей миграции и аккумуляции химических элементов в геологических системах (фундаментальная задача) [Юдович, Кетрис, 2011]. Нормированные таким образом концентрации химических элементов называются коэффициентами концентрации или коэффициентами обогащения.

При изучении объектов окружающей среды, способных аккумулировать химические элементы, поступающие в них в современное время (вода, почва, донные отложения водных объектов, живые организмы), кларковые значения заменяются фоновыми концентрациями (или просто «фоном»). Нормирование на фон позволяет выявлять аномалии химических элементов, вызванные антропогенным или природным воздействием на объекты окружающей среды [Водяницкий, 2008; Даувальтер, 2012]. На основе фоновых значений при эколого-геохимических исследованиях рассчитываются различные индексы и показатели, нацеленные на интегральную оценку антропогенного влияния с выделением степени загрязненности и нанесенного ущерба. В этой связи фоновые значения часто противопоставляют нормативным значениям (ПДК, ОДК), утвержденным ГОСТ или методическими рекомендациями. Однако это их сравнение не совсем корректно, так как нормативы рассчитываются с учетом возможного влияния на

живые организмы, в том числе человека, без учета региональных геологических и геохимических особенностей, а фон, наоборот, подчеркивает эти особенности без привязки к воздействию на биотическую составляющую того или иного природного объекта.

Принимая во внимание, что организмы могут совершенно по-разному реагировать на антропогенное воздействие даже в пределах одной экосистемы, а также то, что в современных ПДК и ОДК мало учитываются климатические особенности регионов и то, как к ним приспособлены организмы, фоновые концентрации представляются более надежной основой для нормирования химических элементов в почвах, воде и ДО. Более того, для экологической интерпретации геохимических данных в противовес использованию нормативных показателей правильнее привлекать анализ поведения самих живых организмов.

В настоящее время наиболее изученной является проблема фоновых концентраций химических элементов в воде и почве для разных регионов России и мира. Анализ региональных геохимических особенностей донных отложений водных объектов носит фрагментарный характер. Таким образом, в настоящий момент проблема фоновых концентраций химических элементов в донных отложениях водных объектов – важнейшая из задач экологической геохимии и геоэкологии. Особенно острой эта проблема ощущается в северных регионах России, где насчитывается большое количество рек и озер природного происхождения и, соответственно, ключевой задачей геоэкологов является оценка их современного состояния с учетом растущей антропогенной нагрузки на окружающую среду по всему миру.

Одним из таких регионов является Республика Карелия, край, насчитывающий около 60 тыс. озер, большинство из которых – это малые озера [Каталог..., 2001]. Следует отметить, что, несмотря на большую историю исследований донных отложений малых озер Карелии [Васильева, 1990; Синькевич, Экман, 1995; Демидов, Шелехова, 2006; Белкина, 2011], серьезных попыток оценить среднее содержание тяжелых металлов в осадках, образованных в водоемах в доиндустриальную эпоху, не было. Хотя о важности изучения тяжелых металлов в сапропелевых илах Карелии отмечалось неоднократно, например в научно-производственном отчете [Оценка..., 2000]. В этой связи была поставлена цель оценить уровень фоновых концентраций химических элементов, в том числе тех, которые относятся к группе тяжелых металлов, для донных отложений малых озер южной части Карелии.

Работы по отбору проб донных отложений 22 малых озер южной части Республики Карелия (рис. 37) проводились в 2016–2018 годах, как в летний, так и в весенне-зимний

период. Пять исследованных озер относятся к категории урбанизированных водоемов, расположенных в черте г. Петрозаводска (Ламба и Четырехверстное), г. Медвежьегорска (Плотичье и Китайское) и г. Суоярви (Кайпинское) [Слуковский, 2018]. Остальные озера расположены преимущественно в лесной или болотно-лесной местности на относительном удалении от крупных населенных пунктов.

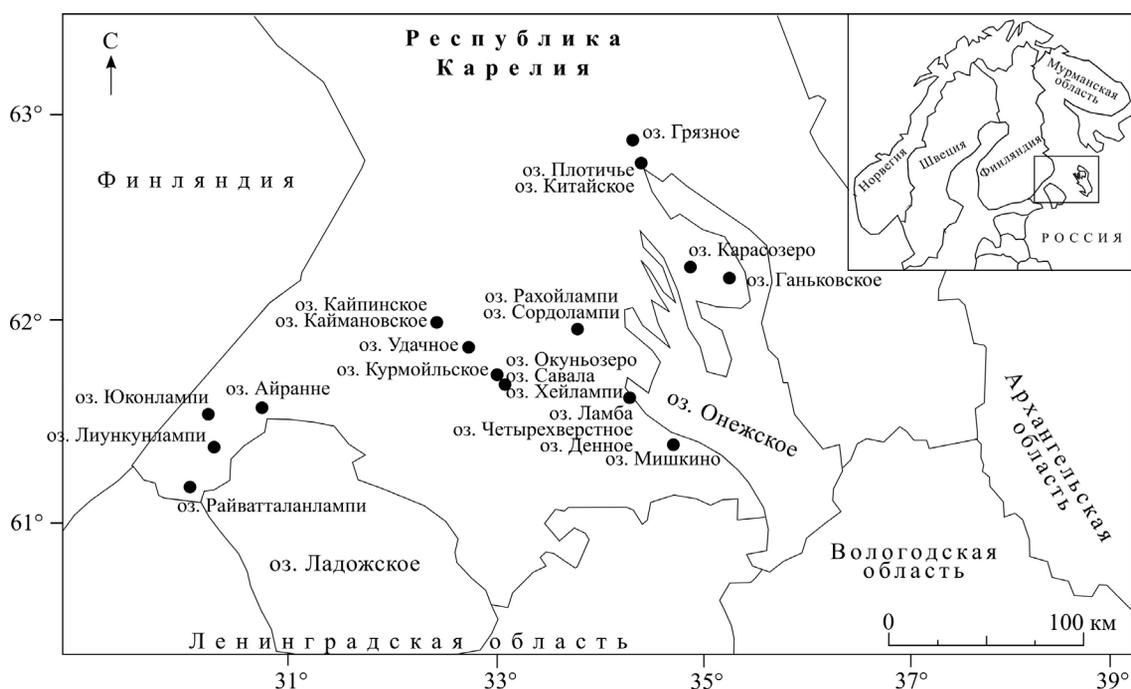


Рис. 37. Район исследований

В основном пробы отбирались пробоотборником Limnos. Поскольку отложения могут отличаться по плотности и обводненности, то колонки получились разными по мощности – от 28 до 48 см. Кроме этого, на оз. Ламба, Четырехверстное, Грязное, Рахойлампи и Денное было проведено бурение отложений до минерального основания, алевроита или глин, подстилающих изучаемые осадки. Для этого был использован ручной бур института торфа (русский бур). Всего за три года было отобрано 278 образцов озерных отложений с различных глубин. Все изучаемые отложения представляют сапропель – самый распространенный тип озерных отложений в Республике Карелия [Синькевич, Экман, 1995]. Доля органического вещества в нем колеблется от 15 до 90 %, однако в основном исследовались озера с 40–50%-м содержанием органического вещества, что позволяет относить их к органическому или органо-силикатному типу отложений. Только осадки оз. Ламба (рис. 38), расположенного в черте г. Петрозаводска [Слуковский и др., 2017],

относятся к органо-железистому типу отложений, что также нередко встречается на территории региона.

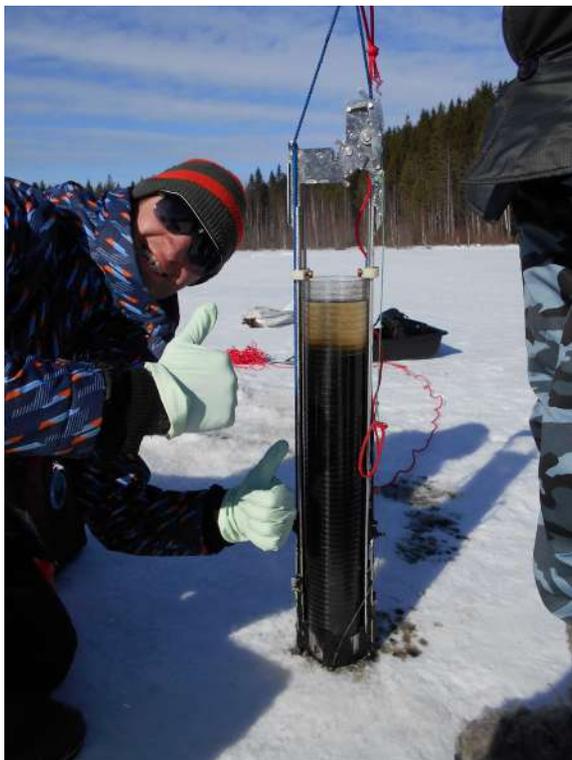


Рис. 38. З. И. Слуковский с колонкой донных отложений оз. Ламба (г. Петрозаводск), фото А. М. Макаровой

Анализ полученных колонок современных отложений малых озер Карелии выявил тенденцию увеличения концентраций химических элементов, прежде всего тяжелых металлов, от нижних слоев осадков к верхним. Наиболее выразительной эта тенденция получается для озер городских районов, главным образом территории г. Петрозаводска, что связано как с мощным влиянием местных источников загрязнения, так и с влиянием процессов дальнего переноса загрязнителей [Слуковский, 2018; Medvedev et al., 2019]. Например, в колонке донных отложений оз. Ламба, расположенного вблизи действующей Петрозаводской теплоцентрали (ТЭЦ), в слоях от 0 до 20 см выявлены аномально высокие концентрации V, Ni, Cr и других металлов, что связано с использованием мазута в качестве топлива (известно, что мазутная зола содержит примеси V, Ni и других металлов [Ganor et al., 1998; Singh et al., 2002]).

Кроме тяжелых металлов, в современных слоях ДО озер урбанизированной среды происходит увеличение литофильных элементов, например лантаноидов [Слуковский, 2019]. Одним из объяснений этого процесса может быть осаждение тонкодисперсной

городской пыли, состоящей из частиц различных силикатных минералов, которые являются основными концентраторами лантаноидов. Происхождение самой пыли может быть связано с различными строительными работами в черте города, а также с зимней посыпкой дорог глинисто-песчаной смесью, которая в летнее время легко разносится ветром.

На неурбанизированных территориях, которые можно назвать условно-фоновыми, основным фактором накопления тяжелых металлов в донных отложениях озер служит дальний перенос [Vinogradova et al., 2017]. Согласно многочисленным исследованиям, к основным агентам дальнего переноса можно причислить Pb, Cd, Hg, Tl, Sb и Bi [Bartnicki, 1994; McConnell, Edwards, 2008; Sarkar et al., 2015]. Обычно эти элементы тесно коррелируют между собой, что дополнительно подчеркивает правоту гипотезы о влиянии дальнего переноса. Большинство остальных элементов, особенно это относится к литофильным элементам, не имеет ярко выраженных аномалий в верхних слоях отложений по сравнению с нижними слоями [Слуковский, 2019; Slukovskii et al., 2020]. Однако в ходе анализа колонок озерных осадков некоторых районов юга Карелии было выявлено, что такие элементы, как Zn, Cu, Sn, также могут демонстрировать поведение, свойственное элементам-агентам дальнего переноса. Учитывая, что вблизи таких озер нет локальных источников поступления данных металлов, то логично предположить, что эти элементы также могли поступать в водоемы посредством атмосферного переноса. В частности, такая ситуация наблюдается для озер юго-западной части Республики Карелия, что можно объяснить влиянием выбросов предприятий Ленинградской области и г. Санкт-Петербурга на формирование геохимических особенностей современных отложений Карелии [Slukovskii et al., 2020].

Для установления фонового уровня содержания химических элементов в полученных колонках донных отложений малых озер юга Карелии было принято во внимание два фактора: скорость осадконакопления в малых озерах соседних регионов (для Карелии таких цифр нет) и непосредственный анализ вертикального распределения маркерных элементов в изученных колонках донных отложений. В качестве одного из таких элементов был выбран Pb, который является наиболее надежным индикатором исторических изменений в окружающей среде 150–300 лет назад [Karlsson et al., 2006; Sarkar et al., 2015; Escobar et al., 2013; Hosono et al., 2016].

Известно, что средняя скорость седиментации в малых озерах Северной Фенноскандии и Мурманской области, регионов, схожих с Карелией по геологии, варьирует от 0.3 до 1.25 мм в год [Håkanson, 1984; Rognerud et al., 2000; Dauvalter, Kashulin, 2010; Даувальтер, 2012]. Принимая во внимание, что южная часть Карелии – это

более облесенный регион по сравнению с Северной Фенноскандией и Мурманской областью и скорость седиментации благодаря обильному поступлению органики в озера в Карелии может быть выше, то за основу была взята цифра в 1.25 мм в год. Таким образом, колонка отложений мощностью 30 см могла образоваться примерно за 240 лет. При этом наиболее заметные изменения в накоплении тяжелых металлов в объектах окружающей среды в северных районах мира начали происходить позже полученной даты, а именно 150–170 лет назад [Keinonen, 1992; Моисеенко и др., 2000; Dauvalter et al., 2011]. Следовательно, в среднестатистическом озере слои донных отложений глубже 20 см можно принимать за фоновые, то есть образованные в доиндустриальное время. Анализ колонок отложений озер, которые были исследованы в рамках данной работы, во многом подтвердил эти предположения.

На рис. 39 видно, что во всех пяти озерах условно-фоновых районов юга Карелии заметное повышение концентраций Pb начинается с глубины 15–25 см. Аналогично ведут себя и другие элементы, а именно Sb, Cd, Tl, Bi и другие, маркирующие влияние глобальных антропогенных выбросов на геохимическую специфику современных отложений малых озер [Kuwaе et al., 2013]. Это также видно на рис. 40, где показано, что рост концентраций Pb, Cd и Tl в современных отложениях оз. Юконлампи (Лахденпохский р-н РК) датируется началом XX века, что связано с индустриальным развитием стран Европы. При этом наиболее заметное увеличение элементов отмечается в послевоенное время, что связано с активным развитием промышленности непосредственно в нашей стране. Средняя скорость седиментации в современное время в оз. Юконлампи, согласно данным датирования, получается 1.25 мм, что как раз совпадает с выбранной ранее цифрой для остальных озер юга Карелии [Slukovskii et al., 2020]. Кроме того, аналогичные скорости седиментации отмечаются в южных районах Финляндии и Швеции [Verta et al., 1998; Karlsson et al., 2006].

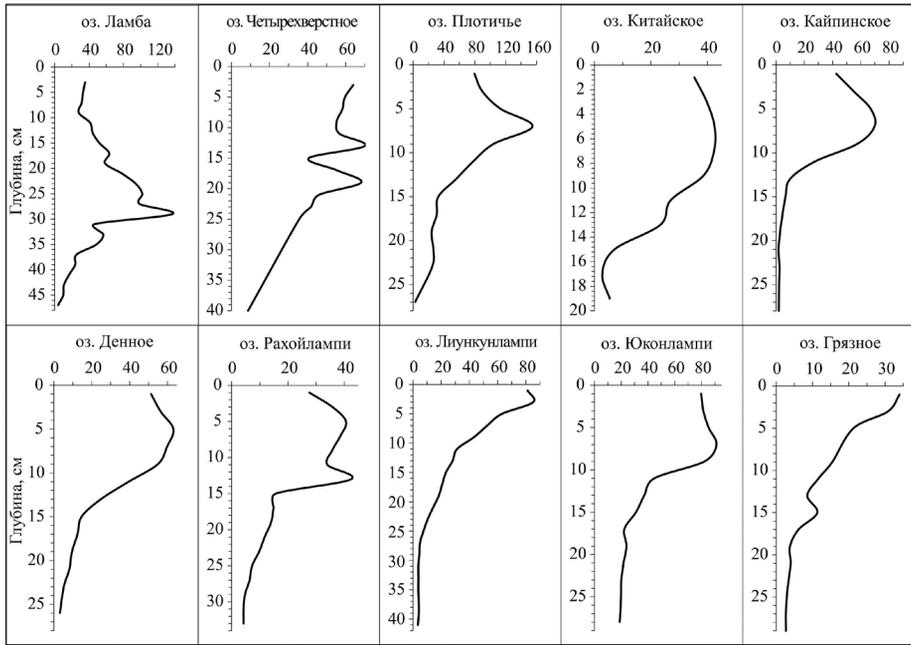


Рис. 39. Вертикальное распределение концентраций Pb в колонках донных отложений малых озер юга Карелии

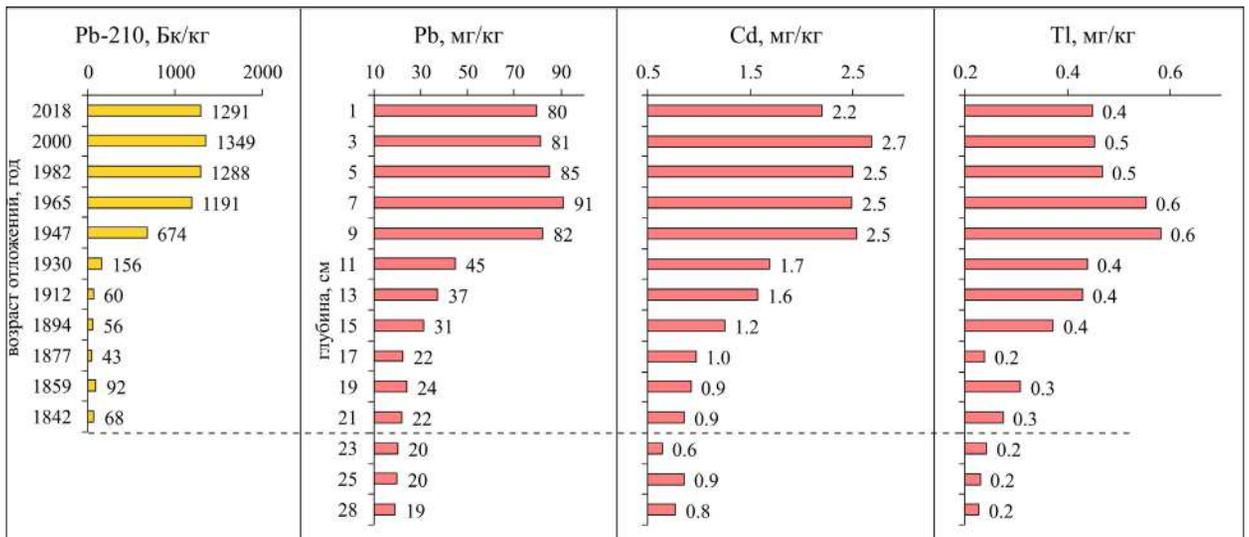


Рис. 40. Распределение ^{210}Pb , Pb, Cd и Tl по глубине в отложениях оз. Юонклампи (Лахденпохский р-н РК)

Однако каждое озеро уникально и скорость седиментации от водоема к водоему может сильно различаться даже в пределах одного региона или его части. Исходя из этого, для расчета фоновых концентраций химических элементов в отложениях малых озер Карелии были использованы только самые нижние слои всех колонок, где концентрация Pb не имеет колебаний значений выше 50–60 % по значению коэффициента вариации. В основном это были слои от 14 до 48 см в зависимости от конкретного озера. Кроме того, в

общий банк данных были включены концентрации химических элементов, определенных в пробах, отобранных при помощи ручного бура с глубин от 1 м и выше. Возраст таких отложений, образовавшихся в промежутке между временем делгляциации территории современной Республики Карелия и началом индустриализации стран Европы и Северной Америки, исчисляется тысячами лет [Синькевич, Экман, 1995]. Следовательно, любые вариации в химическом составе таких отложений можно связать с природными факторами, что допустимо при оценке фоновых концентраций химических элементов.

Итоговые выборки по 42 элементам составили от 73 до 76 образцов. Концентрации большинства химических элементов в выборках не соответствуют нормальному закону распределения, что нередко встречается в геохимии, поэтому за усредненные фоновые концентрации химических элементов принималось значение медианы выборки (x_{Me}), которая, в отличие от среднеарифметического, более устойчива к экстремально высоким значениям в выборках. Другие показатели по каждому элементу представлены в табл. 5.

Таблица 5. Фоновые концентрации (в мг/кг) химических элементов в донных отложениях малых озер южной части Республики Карелия

Элемент	x_{Me}	x_{max}	x_{min}	n
Li	2.7	23.5	0.3	76
Sc	9.0	18.6	1.9	76
Ti	286	2174	46	76
V	32	160	2	74
Cr	18	65	6	76
Mn	437	36610	49	76
Co	6.1	13.4	1.2	76
Ni	24.8	75.2	6.9	76
Cu	33	230	8	76
Zn	95	424	29	75
Rb	6	63	1	76
Sr	35	147	21	76
Y	7	31	2	76
Zr	32	582	4	76
Nb	0.90	6.73	0.16	76
Mo	2.0	12.4	0.5	76
Cd	0.41	1.71	0.08	73
Sn	0.56	1.77	0.34	76
Sb	0.17	0.81	0.06	76

Cs	0.35	2.03	0.03	76
Ba	250	1461	41	76
La	12.7	50.0	2.8	76
Ce	25	116	5	76
Pr	3.0	12.8	0.6	76
Nd	11.3	49.8	2.3	76
Sm	2.21	9.98	0.58	76
Eu	0.46	1.57	0.13	76
Gd	1.69	8.35	0.50	76
Tb	0.28	1.05	0.07	76
Dy	1.46	6.25	0.37	76
Ho	0.28	1.19	0.07	76
Er	0.81	3.26	0.21	76
Tm	0.11	0.42	0.03	76
Yb	0.71	2.88	0.18	76
Lu	0.10	0.42	0.03	76
Hf	0.8	12.8	0.1	76
W	0.35	2.53	0.15	76
Tl	0.14	0.52	0.05	76
Pb	4.6	21.3	0.7	76
Bi	0.08	0.70	0.03	76
Th	2.23	9.77	0.48	76
U	1.5	42.3	0.2	76

Примечание: x_{Me} – медиана, x_{max} и x_{min} – максимальное и минимальное значения выборки, n – число проб.

Сравнивая полученные фоновые значения для малых озер Карелии с аналогичными данными [Håkanson, 1984; Dauvalter et al., 2011; Даувальтер, 2012; Даувальтер, Кашулин, 2014] для соседних регионов (рис. 41), видно, что практически идентичные значения по всем элементам, кроме Cr, устанавливаются для донных отложений озер Карелии и Мурманской области. В озерных осадках стран Скандинавского полуострова отмечается несколько повышенное содержание Pb, Cr, Co и Ni по сравнению с озерами Карелии и Мурманской области. В обоих случаях, вероятно, имеет место быть разница в содержании органического вещества в осадках озер Карелии и озер более северных регионов, так как Pb, как халькофильный элемент, и Cr, Co и Ni, как элементы-сидерофилы, в значительной степени накапливаются в минеральных отложениях, которые больше распространены в

Мурманской области и странах Скандинавии. Кроме того, в этих регионах может быть общий повышенный геохимический фон указанных элементов из-за развития месторождений и рудопроявлений Pb, Cr, Co и Ni.

Также было установлено, что фоновые концентрации тяжелых металлов (Zn, Cr, V) в донных отложениях юга Карелии имеют близкие значения к фоновым концентрациям этих элементов в осадках озер юга Норвегии [Rognerud at al., 2000]. С другой стороны, отложения норвежских озер чуть более обогащены по сравнению с озерами Карелии Co, Pb и Mn, что авторы связывают с развитием руд и рудопроявлений этих элементов на территории юга Норвегии, и чуть обеднены по сравнению с озерами юга Карелии Cu, Ni и Cd. Последнее также может быть связано с геохимической спецификой каждого из регионов. Например, ранее отмечалось повышенное содержание Cu в поверхностных водах южной части Карелии и повышенное фоновое содержание Cd в отложениях рек региона [Геохимическое..., 2004].

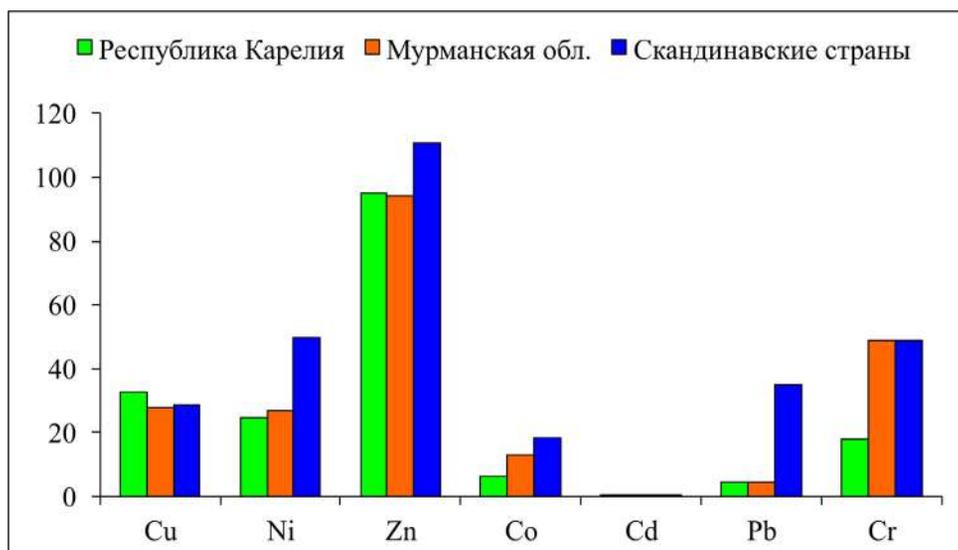


Рис. 41. Средние содержания фоновых концентраций тяжелых металлов в отложениях озер юга Карелии, Мурманской области и стран Скандинавского полуострова

Усредненные концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) в отложениях озер юга Карелии имеют схожий характер распределения с трендом для верхней континентальной земной коры (рис. 42), состав которой обычно берется для анализа поведения литофильных элементов [Sun, McDonough, 1989; Wedepohl, 1995; Интерпретация..., 2001]. В обоих случаях отмечается типичное обогащение легкими РЗЭ и отрицательной аномалией по Eu. Однако в то же время суммарное содержание РЗЭ в верхней континентальной земной коре значительно выше, чем в озерных осадках Карелии, что связано с тем, что в отложениях с большим содержанием органического вещества, к

которым относятся изучаемые озерные осадки, общее содержание РЗЭ обычно невелико. Накопление этих элементов обычно контролируется терригенной фракцией отложений, поэтому в общее содержание РЗЭ обычно выше в минеральных отложениях, где доля органики не превышает 10–15 % [Страховенко, 2011]. Кроме того, РЗЭ, которыми фоновые слои донных отложений малых озер юга Карелии обеднены по сравнению со средним составом континентальной земной коры, они также обеднены и остальными химическими элементами, кроме Мо. Руды и рудопроявления этого металла широко развиты на территории республики [Минерально-сырьевая..., 2006], что, вероятно, сказывается на его накоплении в осадках доиндустриального времени. С другой стороны, верхние слои донных отложений изученных озер значительно обогащены такими элементами, как Pb, Cd, Tl, Zn, Cu, W, V, по сравнению со средним составом континентальной земной коры, что вызвано влиянием антропогенного фактора [Слуковский, 2018].

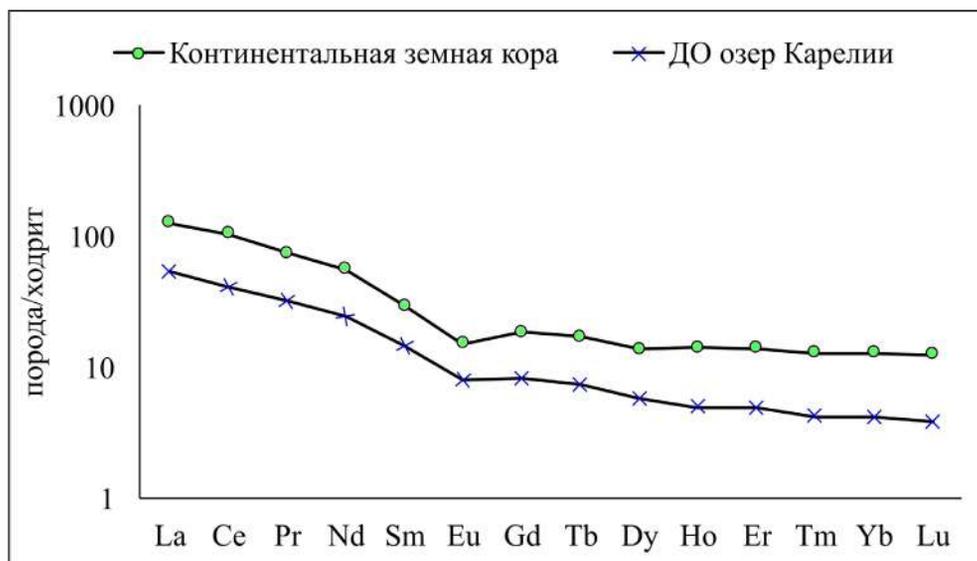


Рис. 42. Тренды нормализованных по хондриту [Sun, McDonough, 1989] усредненных содержаний РЗЭ озер юга Карелии в сравнении с континентальной земной корой [Wedepohl, 1995]

Сравнительный анализ концентраций различных химических элементов в озерных отложениях, полученных в ходе исследований З. И. Слуковского, и в осадках водотоков Карелии, взятых из фоновых источников [Геохимическое..., 2004], показал довольно близкий уровень их накопления в рамках одного региона (рис. 43). Небольшая разница отмечается лишь по Cu, Ba и Zn, которые больше тяготеют к озерным осадкам с большим содержанием органического вещества, и по Li, Sr и Rb, которые интенсивнее накапливаются в речных отложениях благодаря обилию терригенной фракции, несущей преимущественно литофильные элементы. Но в целом полученные данные для озерных

отложений юга Карелии вполне сопоставимы с аналогичными данными для речных осадков, а также для озерных отложений соседних с Карелией регионов России и мира.

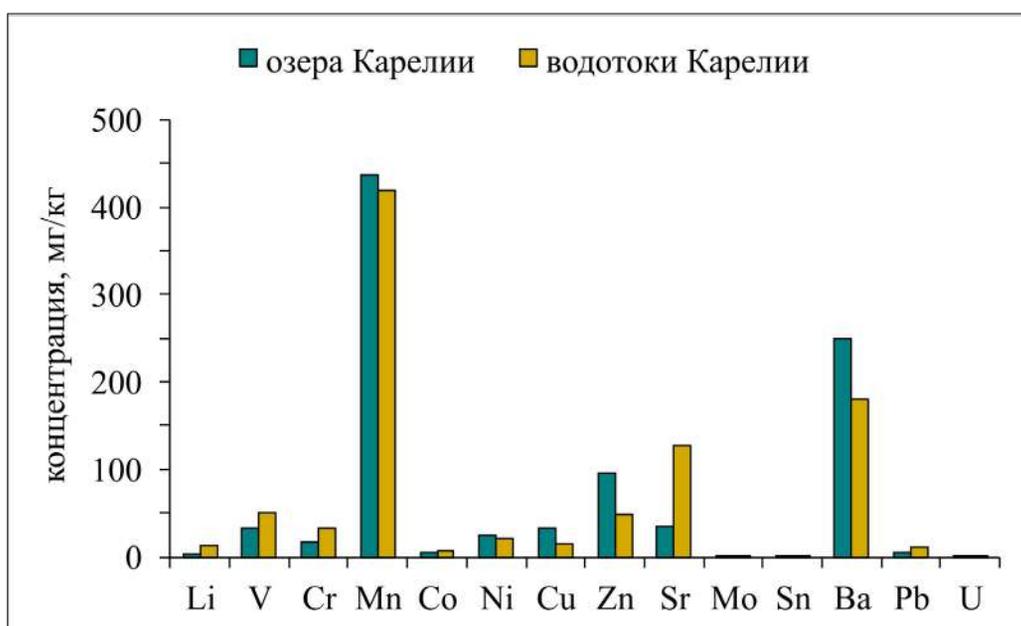


Рис. 43. Средние содержания фоновых концентраций химических элементов в донных отложениях озер и водотоков юга Карелии

С другой стороны, нельзя не учитывать тот факт, что проведенные исследования и исследования более раннего времени с использованием совершенно других методов и приборов могут иметь несовпадения по чисто техническим причинам, не связанным с природными закономерностями распределения химических элементов. В конечном счете полученные результаты будут наиболее востребованы при изучении озерных донных отложений северных регионов России, близких по геологии к территории южной части Карелии. Кроме того, начатые исследования будут продолжены с целью получить более точные данные по фоновому содержанию химических элементов для разнотипных озерных осадков Республики Карелия и, возможно, соседних регионов. Широкомасштабные аналогичные исследования на территории Сибири показали, что органические илы, минеральные, железистые и карбонатные отложения могут иметь существенные геохимические различия [Страховенко, 2011]. Учитывая, что на территории Карелии и Мурманской области, кроме карбонатных отложений, развиты практически все типы современных озерных осадков, к которым также стоит отнести еще диатомиты и диатомовые сапропели, содержащие значительное количество створок отмерших диатомовых водорослей, то такие исследования будут весьма актуальны. Особенно если учесть отсутствие в нашей стране нормативных показателей содержания химических

элементов, в первую очередь тяжелых металлов, для донных отложений любых типов водных объектов.

Глава 4. Фонд сапропеля Карелии

На территории Республики Карелия сапропели являются самыми распространенными типами донных отложений малых и средних озер региона. Наибольшей изученностью сапропелепродуктивных водоемов характеризуется южная часть республики. И это связано не только с природными факторами, влияющими на образование донных отложений, но и с проблемой слабой развитости инфраструктуры в центральных и северных районах региона.

Основными источниками информации о фонде сапропеля Карелии как полезного ископаемого являются отчет «Севзапгеологии» «Оценка состояния и перспективы развития минерально-сырьевой базы торфа и сапропеля на Северо-Западе Российской Федерации. Республика Карелия» [Оценка..., 2000] и монография Е. И. Синькевича и И. М. Экмана «Донные отложения озер Восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита» [Синькевич, Экман, 1995]. Данные фонда сапропеля частично продублированы во втором томе монографии «Минерально-сырьевая база Республики Карелия» в разделе «Неметаллические полезные ископаемые» [Минерально-сырьевая..., 2006]. В Карельском научном центре работы по изучению сапропелевых отложений велись в основном сотрудниками лаборатории четвертичной геологии и палеоэкологии Института геологии. В 1989 году была начата тема «Озерные донные и погребенные отложения Карелии и перспективы их исследования», где значительный акцент делался на анализе практического использования сапропелей с точки зрения народного хозяйства, однако в связи с прекращением финансирования в 1991 году исследования были приостановлены, хотя по плану это должно было произойти только через три года [Синькевич, Экман, 1995].

К вопросу практического использования донных отложений малых озер Карелии сотрудники Института геологии возвращались еще раз в 2000–2001 годах, когда по заданию Комитета по природным ресурсам и Министерства экономики Республики Карелия проводились исследования по проекту «Диатомиты Карелии: особенности формирования, размещения, перспективы использования» [Демидов, Шелехова, 2006]. Кроме широкого освещения исследований диатомитов, в издании приводится и общая информация о донных отложениях озер Карелии, в том числе затрагивается проблема изучения сапропелей. К сожалению, в 2008 году лаборатория четвертичной геологии прекратила свое существование как самостоятельное подразделение. Целенаправленное изучение распространения сапропелевых отложений малых водных объектов Карелии и анализ их полезных компонентов и свойств в настоящее время проводятся сотрудниками

лаборатории геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии (ранее (до 01.01.2017) – лаборатории геохимии и моделирования природных и техногенных процессов) в рамках проекта «Разработка технологии ремедиации деградированных земель промышленных и урбанизированных территорий с использованием сапропеля», финансируемого Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа «УМНИК»).

Из всех карельских озер только на 215 малых озерах были проведены геологоразведочные работы по оценке запасов сапропеля [Оценка..., 2000]. При этом месторождения этого сырья выявлены всего в 164 озерах на общей площади 4,3 тыс. га в границе промышленной глубины сапропелевой залежи с общими геологическими запасами и ресурсами 33,4 млн тонн при 60%-й условной влажности сапропеля [Минерально-сырьевая..., 2006]. Специалистами отмечается крайне низкая изученность озерного сапропеля Карелии: 8,3 % запасов этого полезного сырья (от общих запасов) разведано детально по категории А; 31,1 % – по категории С2; 60,6 % – оценено прогнозно (Р1 и Р2). Большинство озер, наиболее перспективных для добычи сапропелевого сырья, расположены в южной части Республики Карелия (рис. 44): в Лахденпохском, Питкярантском, Сортавальском, Суоярвском, Кондопожском, Медвежьегорском, Прионежском и Олонецком районах.

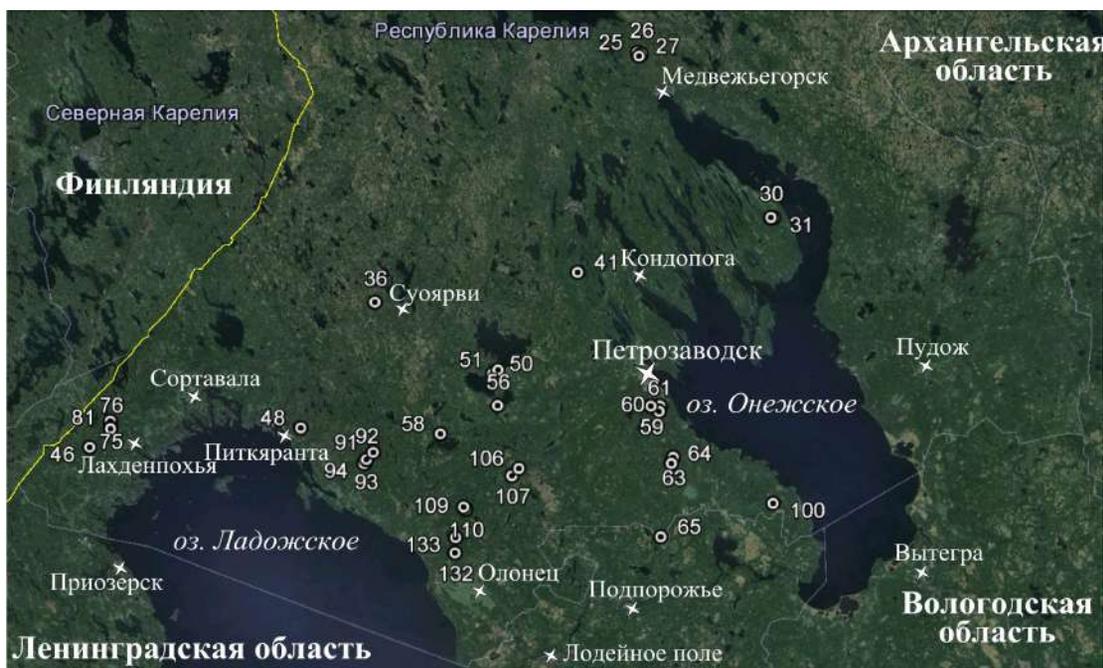


Рис. 44. Карта-схема расположения наиболее перспективных объектов – озер Республики Карелия для добычи сапропелевого сырья (сапропеля) (расшифровка названий водных объектов по указанным номерам приводится в табл. 3)

Все 33 озера (табл. 6), отмеченные на карте-схеме (рис. 44), имеют высокое содержание органического вещества в сапропелевых илах (от 28 до 88 %, среднее – 62 %), значительную мощность полезного осадка (от 1,1 до 9,2 м), а также близость к основным транспортным путям (автомобильные и железнодорожные пути, крупные реки и озера) и большим населенным пунктам Карелии и сопредельных регионов. Один из этих водоемов, оз. Рахойлампи (№ 41), расположенное вблизи п. Спасская Губа (Кондопожский р-н), имеет уникальное для Карелии содержание оксида кальция в сапропеле, что позволяет отнести сапропель этого озера к категории карбонатных осадков.

Таблица 6. Наиболее перспективные месторождения сапропелевого сырья Республики Карелия (данные по: [Оценка..., 2000])

<i>Название озера (район Карелии)</i>	<i>№ на карте (рис. 1)</i>	<i>Площадь озера, га</i>	<i>Мощность сапропеля (ср./макс.), м</i>	<i>Класс сапропеля</i>	<i>Зольность, %</i>	<i>Область использования сырья</i>
Филькино (Мевежьегорский)	25	12.00	2.65/5.00	C2	38.00	Удобрения, лечебные грязи, получение химических продуктов для производства стройматериалов, буровых растворов
Грязное (Мевежьегорский)	26	37.00	1.50/3.00	C2	31.00	Удобрение
Вичка 1 (Мевежьегорский)	27	19.00	2.69/4.50	C2	39.00	Удобрение
Залебязье (Мевежьегорский)	30	4.00	2.53/3.40	C2	22.00	Удобрения, лечебные грязи, для производства строительных материалов, буровых растворов, гуминовых веществ
Гаковское (Мевежьегорский)	31	56.00	2.42/4.80	C2	13.00	Удобрения, лечебные грязи, для производства строительных материалов, буровых растворов, гуминовых веществ

Койль-ярви (Суоярв-ский)	36	43.00	1.34/2.00	C2	47.00	Удобрения
Рахой-лампи (Конпожский)	41	9.00	1,89/3,00	C2	36.00	Удобрения для нейтрализации кислых почв, кормовые добавки
Лиукун-лампи (Лахденпохский)	46	4.00	1.31/3.00	C2	12.00	Удобрения, лечебные грязи, для производства строительных материалов, клеящих добавок, буровых растворов, гуминовых веществ
Мусто-лампи (Пикьярантский)	48	43.00	1.60/3.00	C2	48.00	Удобрения
Савала (Пряжин-ский)	50	67.00	2.55/5.50	A	35–44	Удобрения, мелиоранты для улучшения почв
Окунь-озеро (Пряжин-ский)	51	83.00	1.14/4.40	C2	17.00	Лечебные грязи, удобрение, для производства клеящих добавок, строительных материалов, буровых растворов, гуматов
Ламиниеми Пряжин-ский)	56	30.00	2.00/3.70	C2	44.00	Удобрения, лечебные грязи
Оравуярви (Пряжин-ский)	58	71.00	3.91/8.60	A	53.00	не указана
Полвинное (Прионеж-ский)	59	28.00	1.20/1.90	C2	40.00	Удобрения, лечебные грязи

Круглое (Прионежский)	60	3.00	1.40/2.10	C2	19.00	Удобрения, лечебные грязи, для производства стройматериалов, клеящих добавок, буровых растворов, гуминовых веществ
Уварово (Прионежский)	61	45.00	1.09/2.10	C2	20.00	Удобрения, лечебные грязи, для производства стройматериалов, клеящих добавок, буровых растворов, гуминовых веществ
Болотное (Прионежский)	63	4.00	1.64/2.50	C2	28–45	Удобрения, лечебные грязи, для производства стройматериалов, клеящих добавок, буровых растворов, гуминовых веществ
Мишкино (Прионежский)	64	7.00	1.18/3.00	C2	54.00	Удобрения, лечебные грязи
Пайозеро (Прионежский)	65	19.00	2.03/5.10	C2	62.00	Удобрения, лечебные грязи, для производства буровых растворов, клеящих добавок, строительных материалов, гуминовых веществ
Нисьярви (Лахденпохский)	75	36.00	3.27/6.50	P1	43.00	не указана
Мериянламп (Лахденпохский)	76	27.00	1.75/2.30	P1	23.00	не указана
Уконлампи (Лахденпохский)	81	11.00	1.68/2.00	P1	19.00	не указана
Палоярви (Пикярантский)	91	31.00	3.42/7.70	P1	43.00	Удобрения

Тенхуньярви (Пикьярантский)	92	22.00	3.68/4.90	P1	54.00	не указана
Пяллюсьярви (Пикьярантский)	93	19.00	1.68/2.20	P1	33.00	не указана
Понколанъярви (Пикьярантский)	94	22.00	3.83/5.50	P1	63.00	не указана
Кодъярви (Прионежский)	100	26.00	4.25/9.20	A	54–72	Удобрения, мелиоранты для улучшения почв
Белое (Олонецкий)	106	20.00	1.38/1.70	P1	40.00	не указана
Мяйнтагайне (Олонецкий)	107	78.00	1.49/2.60	P1	50.00	не указана
Нинисельгское (Олонецкий)	109	184.00	2.54/5.80	P1	42.00	не указана
б/н (близ Нинисельгского) (Олонецкий)	110	5.00	1.65/2.20	P1	41.00	не указана
Сармяги (Олонецкий)	132	68.00	2.50/4.70	P1	45.00	не указана
Мудаярви (Олонецкий)	133	16.00	3.80/8.30	P1	51.00	не указана

Согласно фондовым материалам, специалистами, проводившими изучение сапропелевых залежей Карелии, оценены такие показатели, как глубина водоема, мощность полезной толщи, зольность, рН, концентрации СаО и Fe₂O₃ и реже других веществ озерных сапропелевых отложений. Многие из важных для оценки перспективности сапропелей показатели остались неизученными. К ним, в частности,

относятся важные биологические показатели. Согласно классификации сапропелевых отложений, большинство изученных осадков Карелии относится к органо-силикатному типу сапропелей, в меньшей степени представлены силикатные, органические и другие виды сапропелей (рис. 45)

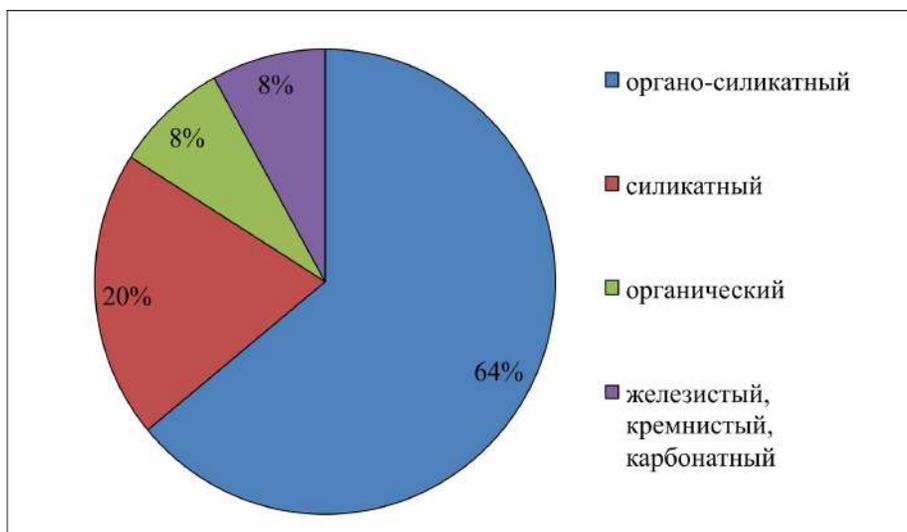


Рис. 45. Распространенность разных типов сапропелей на территории Карелии [Оценка..., 2000]

Особенности химического состава, агрохимические и физические характеристики, многообразие видов позволяют использовать сапропелевое сырье в различных отраслях народного хозяйства: в земледелии, животноводстве и птицеводстве, мелиоративном строительстве и промышленности строительных материалов, медицине, буровой технике, разработке современных биотехнологий [Курзо и др., 2012; Савченко, 2015]. К одним из наиболее перспективных направлений применения сапропеля и/или сорбционных материалов на его основе относится детоксикация разного рода поллютантов в почвах, почвогрунтах, воде и других средах, загрязненных тяжелыми металлами и другими экологически опасными веществами [Кирейчева, Хохлова, 2004; Хлынина, Попов, 2013; Платонова и др., 2014]. Большой популярностью пользуется сапропель в качестве лечебных грязей, которые успешно применяются в медицинской практике для лечения различных заболеваний [Ступникова, Мурадов, 2005]. В настоящий момент на территории Республики Карелия, в том числе в г. Петрозаводске, действуют несколько санаториев, где успешно практикуется использование лечебных грязей, добываемых в оз. Габозеро. Важно заметить, что сама по себе добыча сапропелевого сырья со дна стареющих озер и других небольших водоемов также несет в себе большую экологическую значимость, препятствуя полному заболачиванию водных объектов и, как следствие, способствуя их омоложению [Синькевич, Экман, 1995]. При этом сапропель является восстанавливаемым и относительно недорогим полезным ископаемым с точки зрения его добычи,

транспортировки и хранения перед непосредственным включением в хозяйственную деятельность человека.

Список литературы

Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PilliesStudio, 2006. 498 с. Белкина Н.А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2011. № 4. С. 35-41.

Бобров А.Е., Куприянова Л.А., Литвинцева М.В., Тарасевич В.Ф. Споры папоротникообразных и пыльца голосеменных и однодольных растений флоры европейской части СССР // Л.: Наука, 1983. 208 с.

Болиховская Н.С. Палинологический метод // Палеоботанические методы в изучении палеогеографии плейстоцена (Итоги науки и техники. Сер. Палеогеография. Т. 7). М., 1991. С. 9-14.

Борисова О.К. Методы реконструкции растительности и климата по палинологическим данным // Инновационные методы и подходы в изучении естественной и антропогенной динамики окружающей среды: Материалы всероссийской научной школы для молодежи (Киров, 30 ноября – 5 декабря 2009 г.). Часть 1. Лекции. Киров: ООО «Лобань», 2009. С. 107-118.

Борисова О.К. Развитие растительности на верхневолжской низменности и прилегающих возвышенностях в голоцене: реконструкция по палеоботаническим данным // Стоянка Замостье 2 и развитие природной среды Волго-Окского междуречья в голоцене: Коллективная монография / Сост. О.В. Лозовская, В.М. Лозовский. — СПб: ИИМК РАН, 2018.

Васильева Е.П. Донные отложения // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 147-175.

Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2008. 164 с.

Вронский В.А. Маринопалинология южных морей. Ростов-Дон, Изд-во Ростовского университета, 1976. 200с.

Генкал С.И., Трифонова И.С. Диатомовые водоросли планктона Ладожского озера и водоемов его бассейна / под. ред. В.Г. Девяткин; Ин-т биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН; Ин-т озераведения РАН.- Рыбинск: Изд-во «Рыбинский Дом печати», 2009.- 72 С.

Генкал С.И., Чекрыжева Т.А. Центрические диатомовые водоросли (Bacillariophyta, Centrophyceae) водоемов Карелии // Биол. внутр. вод. 2011. № 1. С. 5 – 16.

Генкал С.И., Куликовский М.С., Михеева Т.М., Кузнецова И.В., Лукьянова Е.В. Диатомовые водоросли планктона реки Свислочь и ее водохранилищ. – М.: Научный мир, 2013. – 236 с.

Генкал С.И., Чекрыжева Т.А., Комулайнен С.Ф. Диатомовые водоросли водоемов и водотоков Карелии / под. ред. В. Г. Девяткин. ИБВВ РАН. М.: Научный мир, 2015. 202 с.

Геологический словарь в 2-х томах. Под редакцией Паффенгольца и др., М. Недра, 1978.

Геология и палеоэкология верхнего плейстоцена Северо-Запада Российской Федерации: отчет о НИР (заключ.)/Институт геологии КарНЦ РАН; рук.И. Н. Демидов; исполн.: Н. Б. Лаврова [и др.]. Петрозаводск. 2002. 163 с. № Г Р 01.9.70004836. (Научный архив КарНЦ РАН. Ф. 13, оп. 4, д. 637. 163 с.)

Геология Карелии. Соколов В.А. (ред.). Ленинград. 1987. 231 с.

Геохимическое картирование севера европейской территории России в рамках международной программы «Экогеохимия Баренцева региона» и проведение опережающего этапа составления геохимических основ Госгеолкарты-1000 третьего поколения на листы Р-35,36. Том 2: Отчет о научно-исследовательской работе / Томилина О.В. и др. СПб. 2004. 146 с.

Гричук В.П. Опыт реконструкции некоторых элементов климата Северного полушария в атлантический период голоцена // Голоцен. М.: Наука, 1969. С. 41-57.

Гричук В.П., Заклинская Е.Д. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: ОГИЗ, 1948. 224 с.

Гричук В.П., Мальгина Е.А., Моносзон М.Х. Значение палеоботанических материалов для стратиграфии валдайских отложений // Последний ледниковый покров на северо-западе европейской части СССР / Ред. И. П. Герасимов. М.: Наука, 1969. С. 57–105.

Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли - индикаторы экологических условий водоемов в голоцене. Л., 1985. 244 с.

Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: МГТУ, 2012. 242 с.

Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Геоэкология озер Мурманской области. В 3 ч. Ч. 3: Донные отложения водоемов. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2014. 214 с.

Девятова Э.И. Природная среда и ее изменения в голоцене (побережье севера и центра Онежского озера). Петрозаводск: Карелия, 1986. 110 с.

Демидов И.Н. Деградация последнего оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 8. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. С.

Демидов И.Н., Лаврова Н.Б., Мельников И.В., Герман К.Э. Палеоэкологические условия голоцена и освоение древним человеком побережья залива Вожмариха на юге Заонежского полуострова // Кижский вестник, № 6. Сборник статей. Петрозаводск, 2001. С. 221-240.

Демидов И.Н., Лаврова Н.Б. Строение четвертичного покрова бассейна р.Водла (Восточная Карелия) и особенности развития растительности в поздне- и послеледниковье // Национальный парк Водлозерский: природное разнообразие и культурное наследие, КарНЦ РАН, Петрозаводск, 2001. С.49-60.

Демидов И.Н., Шелехова Т.С. Диатомиты Карелии (особенности формирования, распространения, перспективы использования). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 89 с.

Демидов И.Н., Шелехова Т.С. Четвертичные отложения и особенности геологического развития в плейстоцене // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории центральной Карелии. Петрозаводск, КарНЦ РАН. 2001. С. 24-35.

Диатомовый анализ. Определитель ископаемых и современных диатомовых водорослей. – Л.: Государственное издательство геологической литературы, 1949. – Кн. 1. – 240 с. Кн. 2. – 288 с.

Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.

Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 4. М., 1951. 619 с.

Елина Г.А. Принципы и методы реконструкции и картирования растительности голоцена / Ред. Н. И. Пьявченко. Л.: Наука, 1981. 156 с.

Елина Г.А., Лукашов А.Д., Юрковская Т.К. Позднеледниковье и голоцен Восточной Фенноскандии (палеорастительность и палеогеография). Петрозаводск: Кар. НЦ РАН, 2000. 242 с.

Заклинская Е.Д. 1951. Материалы к изучению состава современной растительности и ее спорово-пыльцевых спектров для целей биостратиграфии четвертичных отложений // Труды Института географии АН СССР. Вып. 127(48). С. 1–99.

Заславская Н.В. Флора и растительность засоленных приморских экотопов западного побережья Белого моря: дис. канд. биол. наук: 03.00.05, 03.00.16 / Петрозаводск, 2007. 187 с.

Здобин Д.Ю., Семенова Л.К. О гранулометрическом анализе глинистых грунтов: лазерные и классические методы // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 6. С. 560-567.

Интерпретация геохимических данных / под ред. Е. В. Склярова. М.: Интермет Инжиниринг. 2001. 288 с.

Кабайлене М.В. О рассеивании пыльцы ветром и методах его изучения // Палинология в континентальных и морских геологических исследованиях. Рига: Зинатне, 1976, с.155-165.

Кабайлене М.В. Формирование пыльцевых спектров и методы восстановления палеорастительности. Вильнюс: Минтис, 1969. 147 с.

Каталог озер и рек Карелии / под ред. Н. Н. Филатова и А. В. Литвиненко. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 290 с.

Кирейчева Л.В., Хохлова О.Б. Восстановление деградированной почвы сапропелем // Аграрная наука. 2004. № 5. С. 24-25.

Козяр Л.А. Методические основы спорово-пыльцевого анализа кайнозойских отложений. М.: Наука. 1985. 144 с.

Куликовский М. С., Глушенко А. М., Генкал С. И. Кузнецова И. В. Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.

Куприянова Л.А. Палинология сережкоцветных (Amentiferae). М.-Л.: Наука, 1965. 216 с.

Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Палинологическая терминология покрытосеменных растений. Л.: Наука, 1967. 84 с.

Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. Т. 1. 171 с.

Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца двудольных растений флоры Европейской части СССР. Lamiaceae – Zygophyllaceae. Л.: Наука, 1978. 183 с.

Курманов, Р. Г. Палинология [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Р.Г. Курманов, А.Р. Ишбирдин; Башкирский государственный университет. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. — Электрон. версия печ. публикации. — Доступ возможен через Электронную библиотеку БашГУ. — URL:<https://elib.bashedu.ru/dl/read/KurmanovPalinotologiyUchPos.2012.pdf>.

Лаврова Н.Б. Палинологическая характеристика донных отложения Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 207–218.

Лаврова Н.Б. Флора и растительность аллереда перигляциальной зоны восточной

Карелии//Вопросы геологии и палеоэкологии Карелии: По материалам конф. молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С. 36–39.

Лаврова Н.Б., Демидов И.Н. Особенности зарождения малых озер юго-восточной окраины Фенноскандии в позднеледниковье и раннем голоцене // Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии. Материалы международной конференции. 20-24 декабря 2003 г. Минск. С. 166-168.

Лаврова Н.Б., Демидов И.Н., Спиридонов А.М., Герман К.А., Мельников И.В. К вопросу о начале земледелия на севере Онежского озера по палинологическим данным // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.10. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 2007. С. 194-206

Лаврова Н.Б., Филимонова Л.В. Использование анализа состава ископаемой флоры для реконструкции палеоэкологических условий позднеледниковья Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. № 10. 2018. С. 27–43 DOI: 10.17076/есo882

Ладонин Д.В., Карпухин М.М. Фракционирование соединений тяжелых металлов в почвах проблемы выбора метода и интерпретации результатов // «Геоэкологические проблемы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами». Материалы 1-й международной геоэкологической конференции. Тула, 2003, с. 68-73.

Лийвранд Э. Методические проблемы палинostrатиграфии плейстоцена. Таллинн, 1990. 176 с.

Мазей Н.Г., Кусильман М.В., Новенко Е.Ю. Встречаемость пыльцы *Carpinus*, *Fagus*, *Tilia* и *Quercus* в субрецентных спорово-пыльцевых спектрах Восточно-Европейской равнины: к вопросу о возможности дальнего заноса пыльцы // Экология. 2018. № 6. С. 431–439.

Малясова Е.С. Палинология донных осадков Белого моря. Л.: ЛГУ, 1976. 119с.

Методические подходы к использованию биологических индикаторов в палеоэкологии / научн. ред. Л.Б. Назарова. – Казань: Казан. ун-т, 2011. – 280 с.

Методические вопросы палинологии. М.: Наука, 1973. 171 с.

Методы палеогеографических реконструкций: Методическое пособие. Под редакцией П.А. Каплина, Т.А. Яниной. – М.: Географический факультет МГУ, 2010 – 430 с.

Минерально-сырьевая база республики Карелия: в 2-х кн. Кн. 1. Горючие полезные ископаемые. Металлические полезные ископаемые. Петрозаводск, 2006. 280 с.

Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Ильяшук Б.П., Каган Л.Я., Ильяшук Е.А. Палеоэкологическая реконструкция антропогенной нагрузки // Доклады Академии наук. 2000. Т. 370, № 1. С. 115–118.

Монозон М.Х. Определитель пыльцы видов семейства маревых (пособие по спорово-пыльцевому анализу). М.: Наука, 1973. 96 с.

Нейштадт М.И. Палинология в СССР: история и библиография. М.: Изд. АН СССР, 1960. 221 с.

Нейштадт М.И. Спорово-пыльцевой метод в СССР: история и библиография. М.: Изд. АН СССР, 1952. 271 с.

Нерадовский Ю.Н., Даувальтер В.А., Савченко Е.Э. Генезис фрамбоидального пирита в современных осадках озер (Кольский п-ов) // ЗРМО. 2009. Ч. 138, № 6. С. 50–55.

Николаевская Т.С., Филимонова Л.В., Елькина Н.А. Методы исследования пыльцы и спор. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. - 93с.

Оценка состояния и перспективы развития минерально-сырьевой базы торфа и сапропеля на Северо-Западе Российской Федерации. Республика Карелия: Отчет в двух книгах / Гусев О.Н., Смирнова Н.М., Лискович А.Л., Клинецвич В.А., Большакова Л.Н., Соколова Л.М. СПб, 2000. 150 с.

Платонова Д.С., Масоров М.С., Адеев Л.Н. Сорбция меди гуминовыми кислотами из сапропеля омской области // Вестник Омского университета. 2014. № 3. С. 47-50.

Пыльцевой анализ. М.: Госгеолиздат, 1950. 571 с.

Рудая Н.А. Палинологический анализ (учебно-методическое пособие для археологов). Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2010. 48 с.

Рыбаков Д.С., Шелехова Т. С. Диатомеи в донных осадках – индикаторы загрязнения водных экосистем в условиях урбанизации. Экология, 2014, №1, с.45-52

Савельева Л.А., Рашке Е.А., Титова Д.В. Атлас фотографий растений и пыльцы дельты реки Лены. СПб.: СПбГУ, 2013. 114 с.

Савченко И.А. Химико-фармацевтическое исследование гуминовых веществ сапропеля озера Горчаково: автореферат диссертации ... кандидата фармацевтических наук: 14.04.02. Омск. 2015. 22 с.

Сагт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра. 1990.

Светов С.А., Степанова А.В., Чаженгина С.Ю., Светова Е.Н., Рыбникова З.П., Михайлова А.И., Пармонов А.С., Утицына В.Л., Эхова М.В., Колодей В.С. Прецизионный геохимический (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 7. С. 54-73. <https://doi.org/10.17076/geo140>.

Синькевич Е.И., Экман И.М. Донные отложения озер Восточной части Фенно-скандинавского кристаллического щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. 177 с.

Слуковский З. И. Микроэлементный состав донных отложений малых озер как индикатор возникновения экологических рисков в условиях урбанизированной среды Республики Карелии // Водное хозяйство России. 2018. № 6. С. 70–82.

Слуковский З.И. Реконструкция техногенных событий городской среды по данным о содержании редкоземельных элементов в донных отложениях малых озер Карелии и Мурманской области // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В. В. Никонова (Апатиты, 16-22 июня 2019 г.) / Е.А. Боровичев, О.И. Вандыш (ред.). Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН. 2019. С. 162-163.

Слуковский З.И., Даувальтер В.А. Морфология и состав техногенных частиц донных отложений оз. Нюдъявр, Мурманская область // Записки РМО. 2019. № 3. С. 102-117. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1483.102-117

Слуковский З.И., Ильмаст Н.В., Суховская И.В., Борвинская Е.В., Гоголев М.А. Геохимическая специфика процесса современного осадконакопления в условиях техногенеза (на примере оз. Ламба, Петрозаводск, Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 10. С. 45–63.

Слуковский З.И., Шелехова Т.С. Взаимосвязь химического состава и диатомовых водорослей донных отложений озера Четырехверстного (г. Петрозаводск, Республика Карелия, РФ) // Экологическая геология: теория, практика, региональные проблемы: Материалы третьей международной научно-практической конференции (Воронеж, 20-22 ноября 2013 г.). Воронеж: Издательство «Цифровая полиграфия», 2013. С. 207-210.

Слуковский З.И., Шелехова Т.С., Сыроежко Е.В. Отклик диатомовой флоры малого озера на воздействие тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды республики Карелии. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. № 1. С. 103.

Страховенко В.Д. Геохимия донных отложений малых континентальных озер Сибири: дис. ... доктора геолого-минералогических наук: 25.00.09. Новосибирск, 2011. 306 с.

Ступникова Н.А., Мурадов С.В. Физико-химические и микробиологические исследования лечебной грязи месторождения Озеро Утиное Камчатской области // Вестник ДВО РАН. 2005. № 3. С. 76-82.

Тарасов П.Е. Реконструкции климата и растительности северной Евразии позднего плейстоцена по палинологическим данным // Проблемы палеогеографии и стратиграфии

плейстоцена. – М.: Изд-во Московского университета, 2000. - С. 70-97.

Тихомиров Б.А. Очерки по биологии растений Арктики. Изд. АН СССР, М.-Л., 1963, 154 с.

Филимонова Л.В. Отражение состава современной растительности в палиноспектрах средней тайги Карелии // Биоразнообразии, охрана и рациональное использование растительных ресурсов Севера. Материалы XI Перфильевских научных чтений, посвященных 125-летию со дня рождения И.А. Перфильева. Часть 1. 2007. 278–282.

Хлынина Н.Г. Использование сапропеля в качестве сорбента для очистки сточных вод: автореферат диссертации ... кандидата технических наук: 06.01.02. Волгоград. 2008. 24 с.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.

Шелехова Т.С. Диатомовые водоросли в донных осадках озер побережья Белого моря и их палеогеографическое значение. Материалы I палеоальгологической конференции (Москва, 25-28 февраля 2013г.). М: ПИН РАН. С. 152-153.

Шелехова Т.С. Диатомовые водоросли – индикаторы естественной ацидофикации малых водоемов Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.9. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С.189-196.

Шелехова Т.С. Эволюция природы ландшафтного комплексного заказника «Воттоваара» в позднеледниковье и голоцене // Вопросы геологии и экологии Карелии. Петрозаводск, 1999. С.39-44.

Шелехова Т.С., Васько О.В., Демидов. И.Н. Палеоэкологические условия развития северо-западного Прионежья в позднеледниковье и голоцене. // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.8. Петрозаводск. Карельский научный центр РАН, 2005. С. 149-157.

Шелехова Т.С., Колька В.В., Корсакова О.П. Диатомовые водоросли в донных осадках озер побережья Белого моря (район поселка Сумский Посад, Карелия, Россия). Материалы XIII Международной научной конференции альгологов «Диатомовые водоросли: современное состояние и перспективы исследований» (Кострома, 24-29 августа 2013 г.). Кострома. С. 98-99.

Шелехова Т.С., Колька В.В., Корсакова О.П. История озера Коржино по данным диатомового анализа (район поселка Кузема, северная Карелия) //Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып.15. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 151-164.

Шелехова Т.С., Крутских Н.В. Геохимические особенности и состав диатомовых комплексов донных осадков р.Шуи. Труды КарНЦ РАН. Серия: экологические исследования, №6 2013. С.76-90.

Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б. Палеогеографические условия озерообразования на Андомской ледораздельной возвышенности //Труды Карельского научного центра РАН № 3. 2019. С. 80–98 DOI: 10.17076/lim862

Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б. Донные отложения озер Карелии: палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции // Геология Карелии от архея до наших дней. Материалы докладов Всероссийской конференции, посвященной 50-летию ИГ КарНЦ РАН. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2011.С. 204-212.

Шелехова Т.С., Рыбаков Д.С., Слукровский З.И. Оценка состояния водных экосистем в условиях урбанизации по диатомовым комплексам и концентрации химических элементов в донных осадках //Водные объекты города Петрозаводска: Учебное пособие /Ред. А.В. Литвиненко, Т.И. Регеранд. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2013. с. 59-66.

Шелехова Т.С., Слукровский З.И. Диатомовые комплексы позднеголоценовых донных отложений городского озера Плотичье, г. Медвежьегорск, Республика Карелия, РФ // Морфологическая эволюция и стратиграфические проблемы. Материалы LXV сессии Палеонтологического общества при РАН (Санкт-Петербург, 1-5 апреля 2019 г.). СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2019. С. 188-190.

Чернова Г.М. Спорово-пыльцевой анализ отложений плейстоцена-голоцена / Учеб. пособие – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. — 128 с.

Эрдтман Г. Морфология пыльцы и систематика растений. М.: ИЛ, 1956. 486 с.

Яковлев С.А. и др. (Ред.). Методическое руководство по изучению и геологической съемке четвертичных отложений. Ч.1: Общая часть Ч.1. 1954. 302 с

Ярошевский А.А. Проблемы современной геохимии // Изд-во НГУ. 2004. 194 с.

Alenius T.H., Saarnisto M., Taavitsainen J-P., & Lunkka J-P. Records of Land Use and Medieval Settlement History in Vuonninen, Dvina Karelia, Northwest Russia. *Geoarchaeology*, 2011(26,1), 142-163.

Bartnicki J. An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results // *Water Air & Soil Pollution*. 1994. Vol. 75(3-4). P. 227-263. <https://doi.org/10.1007/BF00482939>.

Dauvalter V., Kashulin N. Chalcophile elements (Hg, Cd, Pb, As) in lake Umbozero, Murmansk Province // *Water Resources*. 2010. Vol. 37(4). P. 497-512.

Dauvalter V., Kashulin V., Sandimirov S., Terentjev P., Denisov D., Amundsen P.-A. Chemical composition of lake sediments along a pollution gradient in a Subarctic watercourse // *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous*. 2011. Vol. 46. P. 1020-1033.

Davis M.B. On the theory of pollen analysis // *Amer. J. Sci.* V.261. 1963. P. 897-912

Davis M. Pollen grains in lake sediments: redeposition caused by seasonal water circulation // *Science, New Series*, Vol. 162. № 3855 (Nov.15. 1968. 196-199 pp. DOI:10.1126/science.162.3855.796

Di Stefano C., Ferro V., Mirabile S. Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods // *Biosystems Engineering*. 2010. Vol. 106, No. 2. P. 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.03.013>

Ekman I., Iljin V., 1995. Deglaciation, the Young Dryas end moraine and their correlation in Russian Karelia and adjacent areas // *Glacial deposits in North-East Europe/ Rotterdam, Balkena*. P. 195-209.

Erdtman, G. An introduction to pollen analysis. – Waltham : Chronica Botanica. – 1943. – 270 p.

Escobar J., Whitmore T. J., Kamenov G. D., Riedinger-Whitmore M. A.. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA // *Journal of Paleolimnology*. 2013. Vol. 49 (2) P. 237-252.

Faegri K., Iversen J. Textbook of pollen analysis. Copenhagen. 1964. 168 pp.

Faegri K., Iversen J. Textbook of Pollen Analysis. 4th ed. L.: John Wiley & Sons. 1989. 328 pp.

Ganor E., Altshuller S., Foner H.A., Brenner S., Gabbay J. Vanadium and nickel in dustfall as indicators of power plant pollution. *Water, Air, and Soil Pollution*. 1988; 42: 241–252.

Gregurek D., Melcher E., Pavlov V.A., Reimann C. Stumpfl E.F. Mineralogy and mineral chemistry of snow filter residues in the vicinity of the nickel-copper processing industry, Kola Peninsula, NW Russia // *Mineralogy and Petrology*. 1999. V. 65. P. 87–111.

Grimm E.S. TILIA and TILIA GRAPH: Pollen spreadsheet and graphics program // 8th International Palynological Congress. Programm and Abstracts. Aix-en-Provence, France, 1992. 56 p.

Handbook of paleontological techniques. London. 1965. 852 pp.

Hakanson L. Sediment sampling in different aquatic environments: Statistical aspects // *Water Resources Research*. 1984. Vol. 20, No 1. P. 41–46.

Hosono T., Alvarez K., Kuwae M. Lead isotope ratios in six lake sediment cores from Japan Archipelago: Historical record of trans-boundary pollution sources // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 559. P. 24-37.

Hustedt, F., 1937-39. Systematische und ökologische Untersuchungen über die Diatomeen-Flora von Java, Bali und Sumatra. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* Bd. XV, XVI, "Tropische Binnengewässer" Bd. VII-VIII. Stuttgart (Java). 131-177.

Karlsson S., Grahn E., Düker A., Bäckström M. Historical pollution of seldom monitored trace elements in Sweden — Part A: Sediment properties and chronological indicators // *Journal of Environmental Monitoring*. 2006. Vol. 8. P. 721-731. DOI: 10.1039/b601944g.

Keinonen M. The isotopic composition of lead in man and the environment in Finland 1966-1987: isotope ratios of lead as indicators of pollutant source // *Science of the Total Environment*. 1992. Vol. 113(3). P. 251-268. DOI:10.1016/0048-9697(92)90004-C.

Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae. Teil. 1. Die Süßwasserflora von Mitteleuropa/ Stuttgart*. 1986. p. 1-876.

Krammer K., Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae // Süßwasserflora von Mitteleuropa. Stuttgart ; Jena : Gustav Fischer Verlag, 1991. 576 s.*

Kuwae M., Tsugeki N.K., Agusa T., [et al.]. Sedimentary records of metal deposition in Japanese alpine lakes for the last 250 years: Recent enrichment of airborne Sb and In in East Asia // *Science of the Total Environment*. 2013. N. 442. P. 189–197. DOI:10.1016 / j.scitotenv.2012.10.037.

Lanteigne S., Schindler M., McDonald A.M., Skeries K., Abdu Y., Mantha N.M., Murayama M., Hawthorne F.C., Hochella Jr. M.F. Mineralogy and Weathering of Smelter-Derived Spherical Particles in Soils: Implications for the Mobility of Ni and Cu in the Surficial Environment // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2012. V. 223. P. 3619–3641.

McConnell J.R., Edwards R. Coal burning leaves toxic heavy metal legacy in the Arctic // *Proceedings of the national academy of sciences*. 2008. Vol. 34. P. 12140–12144.

Molder K., Tynni R. Über Finnlands rezente und subfossile Diatomeen. I–VII // *Bull. Geol. Soc. Finland*. 39: 199–217 (1967); 40: 151–170 (1968); 41: 235–251 (1969); 42: 129–144 (1970); 43: 203–220 (1971); 44: 141–149 (1972); 45: 159–179 (1973).

Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. *Pollen analysis*. Blackwell Scientific Publishers, Oxford, 1991. Second Edition. 216 p.

Müller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. □ Veränderungen seit 1971 // *Umschau in Wissenschaft and Technik*. 1979. № 79. P. 778–783. (In German)

Overpeck J.T., Webb III T., Prentice I.C. Quantitative interpretation of fossil pollen

spectra: Dissimilarity coefficients and the method of modern analogs // Quaternary Research. 1985. № 23. P. 87-108.

Reille M. Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord. Laboratoire de Botanique historique et Palynologie, Marseille. 1992. 543 pp.

Reille M. Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord. Laboratoire de Botanique historique et Palynologie, Marseille. 1995. 331 pp.,

Reille M. Pollen et Spores d'Europe et d'Afrique du Nord. Suppl. 2, Lab. Bot. hist. Palynologie, Marseille. 1998. 521 pp.

Renberg, I., Hellberg, T. The pH history of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from subfossil diatom flora of the sediments // *Ambio* V.11, №1, 1982. p.30-33.

Rognerud S., Hongve D., Fjeld E., Ottesen R.T. Trace metal concentrations in lake and overbank sediments in southern Norway // *Environmental Geology*. 2000. Vol. 39 (7). P. 723-732.

Sarkar S., Ahmed T., Swami K., Judd C.D., Bari A., Dutkiewicz V.A., Husain L. History of atmospheric deposition of trace elements in lake sediments, ~1880 to 2007 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. Vol. 120. P. 5658–5669. DOI:10.1002/2015JD023202.

Shelekhova T., Lavrova N. 2019. Paleoenvironmental reconstructions and a sedimentological evidence of paleoseismic activity ca 9000 yr bp in Karelia, NW Russia, based on lake sediment studies on Mount Vottovaara. *Baltica*, 32 (2) 190–201. Vilnius.

Singh M., Jaques P. A., Sioutas, C. Size distribution and diurnal characteristics of particle-bound metals in source and receptor site of the Los Angeles Basin // *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. Iss. 10. P. 1675–1689 DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00166-8).

Slukovskii Z., Medvedev M., Siroezhko E. Long-range transport of heavy metals as a factor of the formation of the geochemistry of sediments in the southwest of the Republic of Karelia, Russia // *Journal of Elementology*. 2020. Vol. 25(1). P. 125-137. DOI: 10.5601/jelem.2019.24.1.1816.

Slukovskii Z.I. Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia. *Вестник МГТУ*. 2020. № 23(1). С. 80-92. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-80-92>

Stockmarr J. 1971 Tablets with spores used in absolute pollen analysis // *Pollen et Spores*. 1971. Vol. 13. P. 615–621.

Strakhovenko V., Subetto D., Hang T., Ovdina E., Danilenko I., Belkina N., Potakhin M., Zobkov M., Gur bich, V. 2018. Mineral and geochemical composition of the Onega Ice Lake sediments. *Baltica*, 31 (2), 165–172. Vilnius. ISSN 0067-3064.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication and processes // Sauders A.D., Norry M.J. (eds.). *Magmatism in the oceans basins*. Geological Society, London, Special Publications. 1989. № 42. P. 313–345.

Tessier A. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals / A. Tessier, P. G. C. Campbell, M. Bisson // *Analytical Chemistry*. – 1979. – Vol. 51, No 7. – P. 844–851.

Tomlinson D.L., Wilson J.G., Harris C.R., and Jeffney D.W., Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index // *Helgol. Wiss. Meeresunters*, Vol.33, 1980, pp. 566-572.

Tylmann W., Łysek K., Kinder M., Pempkowiak J. Regional pattern of heavy metal content in lake sediments in northeastern Poland // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2011. Vol. 216 (1–4). P. 217–228. DOI:10.1007/s11270-010-0529-3.

Tynni R. Uber Finnlands rezente und subfossile Diatomeen VIII–XI // *Geol. Surv. Finland Bull.* 274: 1–55 (1975); 284: 1–37 (1976); 296: 1–55 (1978); 312: 1–93 (1980).

Verta M., Tolonen K., Simola, H. History of heavy metal pollution in Finland as recorded by lake sediments // *Science of the Total Environment*. 1998. Vol. 87/88. P. 1-18.

Vinogradova A., Kotova E., Topchaya V. Atmospheric transport of heavy metals to regions of the North of the European territory of Russia // *Geography and Natural Resources* 2017. No 38(1). P. 78–85. <https://doi.org/10.1134/S1875372817010103>.

Vuorela I. Relative pollen rain around cultivated fields. *Acta Botanica Fennica*. 1973. V. 102. P. 1–27.

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. Vol. 59, No. 7. P. 1217–1232.



Шелехова Татьяна Станиславовна

Кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии Института геологии Карельского научного центра РАН. Специалист в области диатомового анализа, четвертичной геологии и геоморфологии Карелии, палеогеографии позднеледниковья и голоцена Карелии. Автор и соавтор более 100 научных публикаций.

Слуковский Захар Иванович

Кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии Института геологии Карельского научного центра РАН и лаборатории водных экосистем Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. Специалист в области геохимии, геоэкологии, палеолимнологии, биогеохимии и биоиндикации. Автор и соавтор более 130 научных публикаций, руководитель грантов РФФИ и РНФ.



Лаврова Надежда Борисовна

Кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории геохимии, четвертичной геологии и геоэкологии Института геологии Карельского научного центра РАН. Специалист в области спорово-пыльцевого анализа, палеогеографии позднеледниковья и голоцена Карелии. Автор и соавтор более 90 научных публикаций.



ISBN 978-5-6045871-0-2



9 785604 587102