

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

© И. Л. КУЗИН, В. В. СКВОРЦОВ, О. Н. ЯКОВЛЕВ, К. Б. ТОМБАК

ОСОБЕННОСТИ «ГОЛУБЫХ» ОЗЕР ТАЗОВСКОГО ПОЛУОСТРОВА

В зоне гумидного климата широко распространены так называемые «черные» озера. Их воды содержат много гуминовых веществ и растворенного железа, поэтому имеют разной интенсивности желтый с бурым оттенком цвет. На этом фоне резко выделяются изредка встречающиеся озера с прозрачной бесцветной водой. Благодаря массовому развитию на дне синезеленых водорослей (цианобактерий) вода в них имеет зеленовато-голубой цвет. Для краткости и отличия от фоновых «черных» озер эти озера названы нами «голубыми» [11]. Их размеры не превышают 2—3 км (обычно меньше 1 км), глубина — до 3—5 м.

Рассматриваемые аномальные озера давно известны местным жителям и полевым исследователям, в том числе топографам. Об этом свидетельствуют следующие названия озер, изображенных на крупномасштабных картах некоторых регионов: Белое, Светлое, Светлой воды и т. п. До недавнего времени их изучением никто не занимался. В отчетах геологов-съемщиков 50-х гг. прошлого века необычный цвет озер объяснялся отражением в воде голубого неба или окраской дна, на котором встречаются голубовато-серого цвета продукты разрушения диатомитов, опок и других кремнийсодержащих пород. При таком объяснении изменений цвета воды не было необходимости искать более глубокие обоснования образования подобных аномалий.

Нами «голубые» озера впервые были описаны на Тазовском полуострове (севернее Полярного круга), затем их изучение было продолжено в более южных районах Западной Сибири и на европейском Севере России [11—13]. В частности, на Тазовском полуострове в бассейне р. Табьяха обследовано несколько десятков безымянных озер, которым присвоены порядковые номера.

В пределах Тазовского полуострова наблюдается несколько озерно-речных (бассейновых) и речных террас, сложенных песком, глинистым песком и торфом. Под четвертичными отложениями террас залегают пресноводные существенно кварцевые пески с гравием и галькой неогенового и олигоценного возраста. Их подстилают морские диатомиты, диатомовые глины и опоки эоцена и палеоцена. Ниже по разрезу залегают мощные толщи морских нефтегазоносных пород мела и юры. Рассматриваемые «голубые» озера расположены в северной части Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Описываемый район находится в зоне лесотундры и многолетней мерзлоты. Древес-

Таблица 1

Прибрежная и водная растительность «голубого» и «черного» озер

«Голубое» озеро № 29	«Черное» озеро № 75
Название вида	
Осока острая (<i>Carex acuta</i> L.)	Береза карликовая (<i>Betula nana</i> L.)
Осока (<i>Carex</i> sp.)	Ива (<i>Salix</i> sp.)
Мох (класс <i>Musci</i>)	Толокнянка (<i>Arctostáphylos</i> sp.)
Сабельник болотный (<i>Comarum palustre</i> L.)	Осока (<i>Carex</i> sp.)
Возможно, водяной мох <i>Fontinlis</i> sp.	То же
	» »
	» »
	Ситник (<i>Juncus</i> sp.)
	Сфагнум (<i>Sphagnum</i> sp.)
	Рдест (<i>Potamogeton</i> sp.)
	Рдест Фриса (<i>Potamogeton fresii</i> Rupr.)

ная растительность (лиственница и береза) развита преимущественно по долинам рек и берегам озер. Водораздельные пространства обычно заняты кустарниковой тундрой (с карликовой березкой и ивой) с многочисленными озерами и болотами.

Исследования показали, что наряду с необычным цветом «голубые» озера характеризуются рядом других аномалий. Их отличительной чертой является то, что они образуются только там, где существенно распространены кварцевые пески. Поэтому их берега и мелководья (литораль) обычно сложены чистым плотным песком, тогда как в расположенных рядом «черных» озерах — вязким глинистым песком, обогащенным растительными остатками. В них очень мало водной растительности, а ее видовой состав отличается от видового состава растительности обычных озер. Описание донной растительности, отобранной в июле 2010 г., проведено И. М. Распоповым и А. Г. Русановым (Институт озераведения РАН) (табл. 1).

В «голубых» озерах резко сокращен видовой состав ихтиофауны. Если в «черных» озерах много разной рыбы (щука, окунь, ерш и др.), то в расположенных рядом «голубых» озерах ее мало и представлена она только окунем, который иногда имеет уродливую форму — большую голову и узкое (как у налима) туловище. В некоторых озерах рыбы вообще нет.

Установлены также существенные различия в видовом составе и обилии (численности и биомассы) организмов макрозообентоса «голубых» и «черных» озер. Изучено 12 проб, отобранных в «черном» озере № 75 и в «голубых» озерах № 29 и 73. Они отбирались на основных биотопах, располагающихся на глубинах от 0.6 до 3.5 м, по стандартной методике трубчатым дночерпателем МБТЕ (площадь захвата грунта 0.002 м²) и фиксировались 4 %-м формалином. В дальнейшем пробы обрабатывались в лаборатории, где и проводились таксономическая идентификация найденных организмов и определение их веса.

В составе сообщества макрозообентоса обнаружены следующие таксономические группы: *Oligochaeta*, *Mollusca* (*Bivalvia*) и *Insecta* (*Chironomidae* и *Megaloptera*). Повсеместно отмечены пустые домики ручейников (*Trichoptera*). Всего в пробах обнаружено 11 видов и групп беспозвоночных животных,

Таблица 2
Численность и биомасса зообентоса «черного» озера № 75

Виды зообентоса	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²
CHIRONOMIDAE		
<i>Chironomus dorsalis</i>	110	0.6
<i>Tanytarsus gregarius</i>	60	0.3
<i>Psectrocladius psilopterus</i>	450	1.2
<i>Lipiniella araenicola</i>	400	3.6
<i>Aspsectrotanypus trifascipennis</i>	110	2.0
<i>Abladesmyia monilis</i>	110	3.7
<i>Glyptotendipes</i> sp.	110	0.2
MEGALOPTERA		
<i>Sialis lutaria</i>	60	1.1
Сумма	1410	12.9

обычных для российской Субарктики. Пробы отбирались в середине июля, вероятно поэтому невысокое видовое богатство зообентоса связано с вылетом имагинальных стадий гетеротопных организмов (*Chironomidae*, *Trichoptera* и др.).

Величины численности и биомассы зообентоса, приведенные в табл. 2—4, вполне сопоставимы с величинами, характерными для озер Крайнего Севера [1].

Полученные материалы позволяют сделать вывод о существенном различии фаун зообентоса в расположенных рядом озерах. Сравнение видовых списков первоначально проводилось с использованием коэффициента Сёрсенсена (табл. 5) и показало, что наибольшее сходство обнаруживается между озерами № 75 и 73, наименьшее — между озерами № 75 и 29.

Более углубленный кластерный анализ видовых списков с учетом обилия каждого вида позволил тем не менее разбить три исследованных озера на два кластера. Первый кластер образован озером № 75, а второй — озерами № 29 и 73. Различия в видовом составе и обилии между кластерами показаны в табл. 6.

Таким образом, в исследованных озерах установлены различия видового состава организмов зообентоса. На основании результатов проведенного кластерного анализа выявлено, что фауны зообентоса мезогумозного озера № 75 («черного»), с одной стороны, и олигогумозных озер № 29 и 73 («голубых») — с другой, могут быть отнесены к двум различным кластерам.

Таблица 3
Численность и биомасса зообентоса «голубого» озера № 29

Виды зообентоса	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²
<i>Oligochaeta</i> gen. sp.	80	2.9
CHIRONOMIDAE		
<i>Glyptotendipes</i> sp.	170	0.2
<i>Eukiefferiella</i> sp.	80	0.4
<i>Cryptochironomus defectus</i>	80	6.5
Сумма	410	10.0

Таблица 4
Численность и биомасса зообентоса «голубого» озера № 73

Виды зообентоса	Численность, экз./м ²	Биомасса, г/м ²
<i>CHIRONOMIDAE</i>		
<i>Psectrocladius psilopterus</i>	400	0.4
<i>Glyptotendipes</i>	110	2.4
<i>Lipiniella araeicola</i>	60	0.2
<i>Aspsectrotanypus trifascipennis</i>	110	1.1
<i>MOLLUSCA</i>		
<i>Euglesa</i> sp.	60	0.5
Сумма	740	4.7

По гидрохимическому составу воды «черных» и «голубых» озер отличаются содержанием сульфат-иона. В «черных» озерах сульфатов нет или их очень мало (0—3 мг/л), тогда как в «голубых» озерах их заметно больше — до 10—12.5 мг/л. По-видимому, с круговоротом серы при участии цианобактерий связаны указанные и некоторые другие аномалии рассматриваемых озер.

Цианобактерии распространены на литорали и нижней, наиболее увлажненной части пляжа. Они заселяют верхний тонкий слой озерного песка, образуя в нем бактериальное сообщество. По аналогии с ранее предложенным для других групп цианобактерий названием мы называем его цианобактериальным матом, хотя он имеет другие физические характеристики. По Г. А. Заварзину, все цианобактериальные сообщества «матов» построены по одному принципу, обусловленному первичными продуцентами — цианобактериями. Они создают плотный слой на поверхности, который при толщине 1—2 мм полностью поглощает фотосинтетическую и активную радиацию. Сказанное относится к строматолитам — биогенным слоистым породам, представляющим собой литифицированные цианобактериальные сообщества — известняки и доломиты [4, 5]. В отличие от строматолитов цианобактериальный мат «голубых» озер сложен рыхлым песком. В нем отчетливо видны два слоя. Нижний слой представлен светлой студенистой массой (слизью) с погруженными в нее песчинками сине-зеленого цвета. В зависимости от местных условий его толщина колеблется от 1 до 5 мм, обычно она составляет 2—3 мм. Поверх этого слоя залегает слой отмерших цианобактерий и диатомовых водорослей зеленовато- или буровато-серого цвета, содержащий примесь глинистого материала; его толщина — до 2—4 мм.

Таблица 5
Оценка сходства видового
состава исследованных озер
(по коэффициенту Сёренсена)

	Озеро	1	2	3
1	№ 75		0.17	0.46
2	№ 29	0.17		0.22
3	№ 73	0.46	0.22	

При промывании водой песка, слагающего каркас цианобактериального мата, его цвет изменяется. Вначале песчинки освобождаются от покрывающих их с поверхности синезеленых микроорганизмов, в результате чего их цвет становится черным. Оказывается, каждая песчинка мата представляет собой оолит: под сине-зеленой пленкой цианобактерий находится пленка гидротроилита. Этот коллоидный черный минерал ($\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) является гидрогелем, существующим в восстановительной среде. Он образуется при взаимодействии сероводорода с гидроокислами железа. Дальнейшее промывание песчинок мата приводит к их освобождению и от пленки гидротроилита. В конечном результате промывки песка весь материал мата становится светло-серым, как исходный озерный песок.

Углубленного микробиологического изучения цианобактериальных матов «голубых» озер не проводилось.

На литорали озера № 1, названного нами Регин-то (координаты: $66^\circ 45'$ с. ш., $77^\circ 10'$ в. д.), в 1987 г. впервые была обнаружена сине-зеленого цвета слизь (студенистое вещество), залегающее в поверхностном тонком слое песка. Затем такая же сине-зеленая слизь была установлена и на других «голубых» озерах. В пробе из озера № 1 М. М. Голлербах и Н. В. Сдобникова (БИН АН СССР, 1987 г.) определили нитчатые формы синезеленых водорослей из рода *Anabena*, известные своей способностью фиксировать азот атмосферы. В небольшом количестве были отмечены одноклеточные зеленые водоросли, некоторые десмидиевые, хлорококковые, а также, по-видимому, микроспоровые из нитчатых форм. В пробе содержалось большое количество диатомовых водорослей, относящихся к придонным пеннатым формам. Как отметили М. М. Голлербах и Н. В. Сдобникова, в пробе из озера № 29 вода при взбалтывании приобретала ярко-голубой цвет, исчезающий при отстаивании пробы. В этой пробе состав водорослей сходен с составом из озера № 1, но резко отличается наличием крупных одноклеточных форм (диаметр клеток около 30 мкм) ярко-голубой окраски, составляющих основную массу водорослей этой пробы.

Таблица 6
Различия видового состава и численности зообентоса озер
различных кластеров

Видовой состав	Численность, экз./м ²	
	I кластер	II кластер
<i>Chironomus dorsalis</i>	110	0
<i>Tanytarsus gregarius</i>	60	30
<i>Psectrocladius psilopterus</i>	450	0
<i>Lipiniella araencola</i>	400	30
<i>Aspsectrotanypus trifascipennis</i>	110	55
<i>Ablabesmyia monilis</i>	110	0
<i>Glyptotendipes</i> sp.	110	140
<i>Eukiefferiella</i> sp.	0	40
<i>Slalis lutaria</i>	60	0
<i>Euglesa</i> sp.	0	30
<i>Oligochaeta</i> gen. sp.	0	40
Сумма	1410	365

Их систематическая принадлежность не была установлена. Эти микроорганизмы очень своеобразны и, по-видимому, принадлежат к отделу желто-зеленых водорослей, среди которых вообще известны некоторые формы голубого цвета. Эти формы представляют большой интерес. Из озер № 29 и 73 пробы цианобактериальных матов отбирались нами и исследовались Р. Н. Беляковой (БИН АН СССР, 1988 г.) и Е. В. Станиславской (Институт озераведения РАН, 2010 г.). Тонкие слойки мата — донного песка, сцементированные слизью синезеленого цвета, вместе с водой собирались в бутылки и фиксировались 4 %-м раствором формалина до появления слабого запаха. Это делалось для определения видового состава сообществ и выявления видов-эдификаторов синезеленых водорослей.

Проведенный Е. В. Станиславской анализ показал, что в целом видовой состав водорослевой компоненты цианобактериальных матов озер № 29 и 73 очень беден. В составе донного сообщества в озере № 29 обнаружено 11 видов, разновидностей и форм водорослей, а в озере № 73 — всего 9 видов (табл. 7). Помимо синезеленых водорослей в матах обоих озер содержатся диатомовые водоросли.

В озере № 29 основу мата составляют виды рода *Synechococcus*, среди которых видами-эдификаторами можно считать *Synechococcus major* и *Synechococcus major* var. *maximus*, которые определяют структуру исследуемого сообщества. Другие виды синезеленых водорослей встречаются реже, но могут играть важную формообразующую роль в мате. Е. В. Станиславская провела сравне-

Таблица 7
Видовой состав водорослей альгобактериальных матов «голубых» озер

Озеро № 29		Озеро № 73	
Название вида	Встречаемость	Название вида	Встречаемость
Синезеленые водоросли			
<i>Synechococcus major</i> var. <i>maximus</i> Lemm	В массе	<i>Eucapsis alpina</i> Clem. et Shantz	Нередко
<i>Synechococcus major</i> Schör	» »	<i>Lyngbya martensiana</i> Menegh	» »
<i>Synechococcus aeruginosus</i> Naeg	Много	<i>Phormidium tenue</i> (Agardh.) Anagh. et Kom.	» »
<i>Eucapsis alpina</i> Clem. et Shantz	Нередко	<i>Oscillatoria</i> sp.	Редко
<i>Hapalosiphon fontinalis</i> (Ag)Born emend Elenk.	Редко	—	»
<i>Phormidium tenue</i> (Agardh.) Anagh. et Kom.	»	—	»
Диатомовые водоросли			
<i>Achnanthes</i> sp.	Много	<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz	Редко
<i>Achnanthes lanceolata</i> (Bréb.) Grun.	Часто	<i>Eunotia</i> sp.	Единично
<i>Caloneis bacillum</i> (Grun.) Cl.	Много	<i>Navicula radiosa</i> Kütz	»
<i>Eunotia robusta</i> (Ehr.) Rafls	Единично	<i>Frustulia saxonica</i> (Ehr.) De Toni	»
<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz	»	<i>Cymbella silesiaca</i> Bleisch	Редко

ние полученных ею результатов альгологических исследований по озеру № 29 с результатами Р. Н. Беляковой, которое показало, что за прошедшие 20 лет видовой состав стал немного разнообразнее за счет развития диатомовых водорослей, а состав доминирующих видов не изменился. Это свидетельствует скорее всего о том, что экосистема озера находится в стабильном состоянии и не испытывает никаких существенных внешних нагрузок.

В озере № 73 в составе донного сообщества преобладают *Lyngbya martensiana* и *Phormidium tenue*, остальные виды встречены в единичных количествах. В целом развитие водорослей в этом озере что-то ограничивало, так как их количество очень невелико. Основу пробы составляют детрит и некоторые донные беспозвоночные животные. Возможно, в этом случае мы имеем дело не с альгобактериальным сообществом, а с сообществом микрофитобентоса, где водоросли не связаны строгими симбиотическими связями с микроорганизмами и поэтому могут иметь такой невысокий уровень развития. В этом озере за 20 лет произошло определенное изменение видового состава водорослей: из донного сообщества выпали идентифицированные ранее зеленые водоросли *Mougeotia* sp. ster., *Oedogonium* sp. ster., *Microspora pachyderma* (Wille) Lagerh. Развитие зеленых водорослей в предшествующий период также может свидетельствовать о том, что в озере нет и не было развитого цианобактериального сообщества.

По мнению Е. В. Станиславской, озера № 29 и 73 различаются по видовому составу водорослей, обитающих на мелководье, и, видимо, относятся к озерам разного трофического уровня и химического состава воды.

Как уже отмечалось, цианобактерии имеют обильный слизистый покров, обладающий большой клеящей способностью. Эта слизь цементирует песок до состояния слабого песчаника, поэтому при слабом ветре и легком волнении воды в озере мат сохраняет целостность. Однако при более сильном ветре, особенно во время шторма, он распадается на разной величины тонкие плитки, которые затем разрушаются до состояния сине-зеленого песка. Слагающие его микроорганизмы рассеиваются по всей массе озерной воды, которая из бесцветной становится зеленовато-голубой. На месте размытого мата образуется шлик — темно-серого или черного цвета песок, обогащенный железистыми минералами. В результате многократного разрушения цианобактериальных матов в донных осадках образуются прослойки черного и серого шлика. Например, на озере № 1 у устья «черного» ручья образовались прослойки обогащенного железом песка мощностью до 10 см. После шторма цианобактерии оседают на дно, образуя новый мат, а вода снова становится прозрачной и бесцветной. На участках озер, где во время шторма происходила аккумуляция песка, существовавший ранее цианобактериальный мат покрывается слоем промытого песка, на котором образуется новый мат. На некоторых участках озер наблюдается до 0.3—0.6 м песка, содержащего десятки погребенных цианобактериальных матов и продуктов их жизнедеятельности, играющих важную роль в биогеохимической жизни «голубых» озер [13].

Химические анализы, проведенные в полевых условиях, а позднее в Лаборатории аналитического контроля Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова, показали, что черный и темно-серый песок и вода со взвесью синезеленых водорослей, полученные при промывании мата, содержат значительное количество железа. Если обычно в воде «голубых» и «черных» озер содержание железа общего составляет 0.1—0.3 мг/л, то в «шлихе» оно увеличивается до 5 мг/л, а в промывочной воде даже до 20 мг/л. Сразу по-

Таблица 8
Результаты анализа воды «голубых» озер № 73 и 29, проведенного в полевых условиях
(июнь 2010 г.)

Показатели	№ проб						Примечания
	73/1	73/2	29/1	29/2	29/9-1	29/9-2	
	Глубина отбора, м						
	0.3		0.3		1.5		
pH	6.4	5.9	6.1	6.4	5.6	5.7	Ионометрия » » Качественная реакция
O ₂ , мг/л	9.5	9.7	9.7	9.8	9.8	9.8	
Fe ⁺⁺⁺			< 0.56 мг/л				
S ⁺⁺			< 0.03 мг/л				
SO ₄ ⁻			< 9.6 мг/л				
Fe ⁺⁺			Отсутствует				

сле отбора пробы железо находится в двухвалентной форме. При стоянии пробы в открытом сосуде на свету черный шлик постепенно становится рыжим, вода над ним желтеет и уже не дает качественной реакции на Fe⁺⁺. При добавлении капли соляной кислоты к шлику ощущается сильный запах сероводорода, что тоже подтверждает наличие гидротроилита в цианобактериальном мате (табл. 8, 9).

В местах отбора проб в черном песке Eh колеблется от 162 до 282 мв, что указывает на восстановительную обстановку внутри мата.

В табл. 10 приведены результаты химического анализа вод озер рассматриваемого участка, из которых следует, что воды близки по составу, хотя есть и отличия: в «черном» озере содержится больше железа, калия, магния.

Рассматриваемые нами химико-бактериологические процессы наиболее интенсивно происходят в песках у устьев ручьев и в небольших заливах, состоящих гуминовые вещества, захватывая растворенные соли и очищая сами воды.

Нами установлено [12, 13], что для существования цианобактериального мата требуются строго определенные условия. Он образуется только в тех озерах, воды которых содержат оптимальные количества органического вещества, серы, железа и, возможно, кремниевой кислоты. При отсутствии или недостатке одного из этих компонентов мат не образуется, аномальные явления на та-

Таблица 9
Исследование черного песка и промывочной воды из мата озера № 29

Показатели	Черный песок мата	Промывочная вода из черного песка мата	Примечания
Fe ⁺⁺ , мг/л	+	++	Определено качественно в день отбора пробы
Fe общее	5 мг/г	20 мг/л	Колориметрия в стационарной лаборатории
pH	4.3*	5.3	Определено в момент отбора

Примечание. *Определено в пробе воды на месте ее отбора в мате.

Таблица 10
Химический состав воды озер

Показатели	Место отбора проб			
	Озеро № 73, проба 73/1, гл. 0.3 м	Озеро № 73, проба 73/6, гл. 1.5 м	Озеро № 29, гл. 0.3 м	Озеро № 75, гл. 0.3 м
рН	6.1	6.1	6.2	5.2
Цветность, град.	2	0	0	12
Мутность	0	0	0	0.2
Железо, мг/л	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.35
Калий, мг/л	Н/обн	Н/обн	0.1	0.22
Натрий, мг/л	То же	То же	0.29	0.4
Кальций, мг/л	» »	» »	< 0.1	< 0.1
Магний, мг/л	» »	» »	0.04	0.27
Сульфат, мг/л	1.6	0.65	2	1.35
Фосфат, мг/л	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
Хлорид, мг/л	1.52	Н/обн	3	0.63
Нитрат, мг/л	Н/обн	То же	0.54	< 0.05
Нитрит, мг/л	То же	» »	< 0.05	< 0.05
Сухой остаток, мг/л	16	22	8	20
Кремниевая кислота, мг/л	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Жесткость, ммоль/л	0.09	0.04	0.05	0.05

ких озерах не возникают, вода остается «черной». В процессе жизнедеятельности слагающие мат микроорганизмы потребляют содержащиеся в воде органические вещества и серу и выделяют днем кислород, а ночью — сероводород. Как уже отмечалось, при соединении сероводорода с растворенным в воде железом образуется гидротроилит, который оседает в мате, где со временем переходит в пирит. Биохимическое окисление пирита приводит к образованию серной кислоты и заметному снижению рН воды. Периодическое образование сероводорода и серной кислоты губительно действуют на фито- и зообентос. Лишенные растительности светло-серые пески пляжа и литорали хорошо видны на аэро- и космоснимках, что позволяет уверенно проводить картирование рассматриваемых аномальных озер.

В результате указанных биохимических процессов вода осветляется, становится прозрачной и бесцветной (ее цветность равна нулю или близка к нему), а донные осадки обогащаются железом. В табл. 11 приведены химический состав и водородный показатель воды некоторых озер района работ, а также ручьев, вытекающих из гряд, сложенных опалитами.

В гумидной зоне воды озер обычно слабо минерализованы и почти не содержат сульфатов (0—3 мг/л). Органические вещества и железо в них постоянно поступают со стоком из окружающих болот. На Тазовском полуострове, как и вообще в Западной Сибири, источником сульфатов являются морские породы мела и палеогена. Как уже отмечалось, в нормальном залегании эти породы перекрыты пресноводными олигоценowymi, неогеновыми и четвертичными отложениями общей мощностью до 200—300 м. Однако на некоторых участках процессами глиняного диапиризма они выведены на дневную поверхность, где образуют разной величины системы складок, выраженных в рельефе в виде гряд и разделяющих их межгрядовых понижений — так называемого парал-

Таблица 11

Химический состав вод в водоемах района исследований

Место отбора проб	№ проб	pH	Минерализация, мг/л	Содержание ионов, мг/л						
				HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	K	Na
Оз. Регин-то	1	6.0	12.0	10.0	1.0	1.0	1.0	Н/обн	Н/обн	4.0
То же	2	5.0	51.1	42.7	10.6	Н/обн	Н/обн	4.3	То же	14.9
Оз. Второе длинное	3	5.0	40.5	36.6	7.1	То же	То же	4.3	» »	10.3
Оз. № 29	4	7.0	21.0	20.0	1.0	2.0	» »	Н/обн	» »	8.0
Оз. № 73	5	6.0	21.0	10.0	4.0	4.0	1.0	То же	» »	7.0
Оз. № 44	6	6.0	4.9	5.8	1.0	Н/обн	1.0	» »	» »	Сл.
Оз. № 55	7	7.5	55.9	61.0	3.5	То же	10.0	2.2	» »	9.7
Лед из диатомита гряды	8	6.0	55.5	42.7	5.3	» »	4.0	Н/обн	» »	14.9
То же	9	5.0	51.1	42.7	10.6	» »	Н/обн	4.3	» »	14.9
Ручей, вытекающий из диатомита гряды	10	4.0	62.6	61.0	7.1	» »	То же	4.3	2.5	18.2
Р. Нгарка-Табьяха	11	5.0	40.6	36.6	47.1	» »	0.7	4.3	Н/обн	9.7

лельно-грядового рельефа [10]. Ядра гряд обычно сложены диатомитами, трепелами и опоками эоцена и палеоэоцена, на которых залегают более молодые пресноводные песчано-глинистые отложения. К межгрядовым понижениям приурочены болота и озера, часто имеющие вытянутую форму. Поверхностными и подземными водами сульфаты из слагающих гряды пород выносятся в прилегающие озера, где они активизируют жизнедеятельность микроорганизмов.

Большинство озер этого участка — «аномальные», так как расположены в заболоченных понижениях между грядами. Из болот в них выносятся органические вещества и железо, а из пород, слагающих гряды, — сульфаты, т. е. вещества, необходимые для образования цианобактериального мата. В процессе жизнедеятельности слагающих мат микроорганизмов вода осветляется, озера становятся то более, то менее «голубыми». Нормальные («черные») озера на участках распространения параллельно-грядового рельефа встречаются редко. Исследованное нами озеро № 75 находится в долине р. Нгарка-Табьяха (в переводе с ненецкого — Большая песчаная река). Все пространство между коренными ее берегами занято лишенным растительности песком. Вместо единого русла наблюдается несколько меандрирующих протоков. Озеро № 75 представляет собой старицу одной из протоков. Его длина достигает 300 м, ширина — 40 м, глубина — 3 м. Песчаные золотые бугры препятствуют попаданию в озеро речной воды во время паводков.

Интенсивное развитие цианобактерий наблюдается только после выпадения обильных дождей, воды которых с большой площади смывают в озера не только серу, но и органику, и железо. Обычно это происходит на больших участках озер, прилегающих к устьям приносящих эти вещества ручьев. Здесь нижний слой мата в это время имеет наибольшую (до 4—5 мм) толщину и сочный сине-зеленый цвет. Уже на удалении 100—150 м от этих участков его толщина сокращается до 2—3 мм, а цвет становится менее ярким. Через несколько дней после обильных дождей жизнь в цианобактериальных матах замирает до следующих дождей. Приведенные сведения дают основание говорить о том, что периодическое и неравномерное вдоль береговой линии озера поступление различных химических веществ является причиной изменяющегося во време-

ни и пространстве характера жизнедеятельности цианобактериального мата — выработки в нем кислорода и сероводорода и как следствие — осаждения растворенного в воде железа.

О связи аномалий «голубых» озер с жизнедеятельностью специфической группы микроорганизмов, способных периодически вырабатывать сероводород и осаждать содержащееся в воде железо, до недавнего времени ничего не было известно. Наши исследования представляют собой первый шаг в изучении этой сложной проблемы.

Цианобактерии являются самой древней группой автотрофных организмов на Земле, а возможно, и живых организмов вообще. Их ископаемые остатки находят в отложениях, возраст которых превышает 3.5 млрд лет. Установлено, что строение клетки ископаемых микроорганизмов почти не отличается от строения клетки ныне живущих видов. Это значит, что в процессе эволюции они почти не претерпели изменений, поэтому их иногда называют живыми ископаемыми. Микрофоссилии цианобактерий, возраст которых более 2 млрд лет, можно классифицировать по современным определителям синезеленых водорослей [4, 6].

Самыми древними продуктами жизнедеятельности цианобактерий считаются строматолиты — карбонатные наросты (биогермы) на дне водоемов, имеющие сложную внутреннюю слоистость. Их образование началось в раннем архее (около 3.5 млрд лет назад) и продолжается до настоящего времени. Наиболее широкое их распространение приходится на поздний протерозой, карбонатные фации которого почти повсеместно содержат разнообразные породообразующие строматолиты [16].

Следует заметить, что современные строматолиты, всестороннее микробиологическое изучение которых позволило выявить строение строматолитов архея и протерозоя, были найдены сравнительно недавно — в 30-х гг. прошлого века. На литорали одного из заливов Австралии и на атлантическом побережье Багамских островов были найдены небольшие рифовые постройки не известного ранее типа — плосковершинные известковые «бочки» диаметром 1.0—1.5 м и располагающиеся ниже уровня отлива слоистые корки. Оказалось, что это современные строматолиты. Они образуются в процессе жизнедеятельности цианобактериального мата, расположенного на верхней поверхности строматолита. Мат представляет собой плотный многослойный «ковёр» толщиной до 2 см. Его основу составляют цианобактерии, наряду с которыми в формировании сообщества участвует много других разных микроорганизмов. Внутри мата легко различаются несколько функционально дискретных слоев [5, 16].

По нашему мнению [12, 13], с цианобактериями связано образование не только строматолитов, но и широко распространенных на разных континентах железистых кварцитов (джеспилитов) докембрия, на долю которых приходится 95 % всех железных руд Земли. До настоящего времени происхождение этих осадочных пород, в которых иногда встречаются синезеленые водоросли, остается неясным, хотя в течение более ста лет изучения специалистами разных стран предложено много гипотез их образования [13]. Железистые кварциты являются биогенными осадками, образовавшимися в процессе жизнедеятельности цианобактериального мата и измененными затем процессами метаморфизма. Самыми древними породами, в которых они описаны, являются гнейсы, возраст которых от 3.8 до 3.5 млрд лет. Как и строматолиты, наиболее широко железистые кварциты развиты в породах протерозоя. Постоянство состава этих биогенных железосодержащих отложений, развитых на разных континентах,

указывает на громадные размеры древних мелководных бассейнов, в которых они накапливались. Однако в фанерозое, с появлением радиолярий и других микроорганизмов, панцири и скелеты которых сложены кремнеземом, образование железистых кварцитов практически прекратилось. Некоторые исследователи отмечают присутствие этих фаций в отложениях палеозойского и мезозойского возраста [3]. Мы же считаем, что цианобактериальные маты современных «голубых» озер являются сохранившимися до наших дней сообществами докембрийских микроорганизмов, с жизнедеятельностью которых было связано образование железистых кварцитов архея и протерозоя.

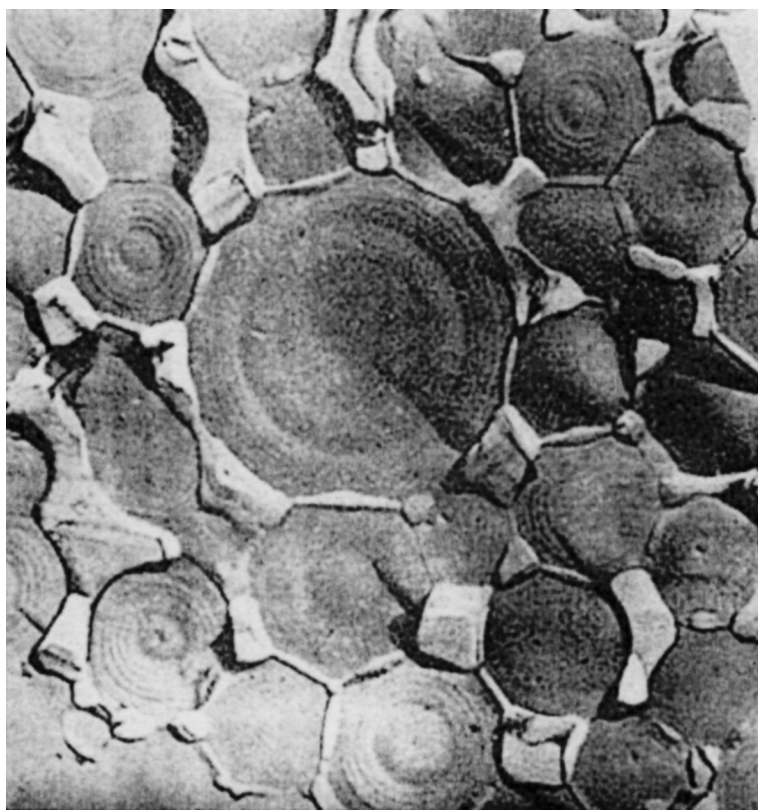
Сложность изучения проблемы образования железистых кварцитов (джеспилитов) состоит в объяснении условий накопления осадков, в которых чередуются тонкие слои кварцита, окислов железа и органики. Ни одна из предложенных ранее гипотез не может объяснить механизма попеременного осаждения тонкослоистых осадков такого разного состава. Нашими исследованиями на «голубых» озерах установлено, что тонкие слои органического вещества (синезеленых водорослей и других микроорганизмов), а также в разной степени окисленного железа образуются внутри цианобактериального мата. Натурные наблюдения позволяют говорить о том, что и слои кварцита в докембрийских породах образовались в процессе жизнедеятельности микроорганизмов мата. При их участии из воды осаждался аморфный кремнезем (опал), который со временем обезвоживался и переходил в кристаллический кремнезем.

Как отмечалось выше, все изученные «голубые» озера располагаются по соседству с выходами на дневную поверхность опалитов-диатомитов, трепелов и опок, слагающих описанные выше гряды. Из этих пород поверхностными и подземными водами в «голубые» озера выносятся не только сульфаты, но и кремниевая кислота (гель), из которой оседают образующие опал мельчайшие глобулы. Сведения о деталях строения и условиях образования этого минерала получены в последние годы с использованием электронного микроскопа [8, 18, 19].

Опал является аморфным кремнеземом с непостоянным количеством воды ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). В благородных опалах ее содержание колеблется от 6 до 10 %, а в неблагородных — достигает 21 и даже 32 %. При геологическом старении опал теряет большую часть содержащейся в нем воды и из аморфного превращается в кристаллический кремнезем (кварц) [2].

Опал представляет собой осадочную породу, сложенную микроскопическими (около 0.2 мкм) глобулами (шариками), плотно прилегающими друг к другу. Промежутки между глобулами заполнены воздухом, водяным паром или водой. У благородных опалов глобулы имеют примерно одинаковые размеры и располагаются в строгом геометрическом порядке (наподобие пчелиных сот). Такая укладка глобул с разделяющими их промежутками образует подобие правильной трехмерной дифракционной решетки, способной разлагать свет на цвета спектра (появляется иризация). Неблагородные опалы сложены хаотично расположенными глобулами, сильно различающимися как по размерам, так и по форме. При 1000-кратном увеличении видно, что глобулы не однородны, а состоят из концентрических оболочек (сфер), сложенных более мелкими (0.02—0.05 мкм) частичками опала (см. рисунок).

В настоящее время получены искусственные благородные опалы. Они обладают той же микроструктурой, что и природные благородные опалы, т. е. строгой последовательностью упаковки мельчайших шариков кремнезема. Однако эти шарики монолитны, в них нет характерных для естественных опалов сфер [8, 18].



Сферическое строение глобулей опала при увеличении в 1000 раз [18].

Образование сфер в слагающих опал глобулях некоторыми исследователями связывается с минерализацией встречающихся в них микроорганизмов (цианобактерий), выполняющих роль «затравки». На микроскопических взвешенных в жидкости органических затравочных «пылинках» постепенно формируются шарообразные сферолиты. Их образование продолжается до тех пор, пока не истощится питающий раствор или пока сферолиты не начнут соприкасаться и уплотнять друг друга [8, 18].

Кремнеземосажающие диатомовые водоросли появились только в мезозое. В Западной Сибири образованные ими диатомиты, трепелы и опоки имеют очень широкое распространение. В палеоценовых отложениях севера этого региона содержание кремнезема составляет: в диатомитах 76.4, а в опоках — 83.27 % , из них на долю аморфного кремнезема (опала) приходится 45.25 и 62.22 % соответственно [15]. Образующаяся при растворении опала кремниевая кислота (гель) выносится в «голубые» озера, в которых при ее участии осуществляется жизнедеятельность цианобактериального мата. Это вторичный, переотложенный кремнезем.

В докембрии кремнезем в водоемы поступал из недр Земли. Мы считаем, что в бассейнах архея, протерозоя и раннего фанерозоя осаждение опала (аморфной разновидности кварца), как и железа, и органического вещества происходило в цианобактериальных матах на многочисленных тогда участках выходов горячих вод на поверхность. И в настоящее время опал (гейзерит) обра-

зуется на участках выходов горячих источников и гейзеров. В этом процессе принимают участие и синезеленые водоросли (цианобактерии): при образовании силикатных минералов микроорганизмы служат центрами нуклеации; далее процесс минералообразования происходит автокаталитически [14]. Изучение процесса современного образования гейзерита (опала) на Камчатке (в Долине гейзеров) показало, что как в руслах термальных источников (температура выше 90°), так и на поверхности гейзеритовых покровов обычно развиваются синезеленые водоросли. Под электронным микроскопом видно, что часто эти микроорганизмы буквально пронизывают массу гейзерита, занимая более 50 % ее объема. «Колонии термофильных микроорганизмов являются своеобразной матрицей, по которой происходит опализация при гейзеритообразовании» ([9], с. 236). Этот факт заслуживает пристального внимания, так как гейзериты и цианобактерии являются составной частью древнейших осадочных пород Земли — железистых кварцитов (джеспилитов).

По нашему мнению, на протяжении нескольких миллиардов лет на Земле существовали условия, благоприятные для существования двух главных сообществ цианобактерий. Жизнедеятельность одной из них сопровождалась формированием известняков и доломитов, второй — разных по составу тонкослоистых песчаных осадков, из которых в процессе метаморфизма образовались железистые кварциты (джеспилиты). В конце протерозоя условия для существования сообществ этих микроорганизмов постепенно изменялись, изменялись ареалы их распространения и масштабы осадкообразования. В наши дни эти сообщества сохранились только на небольших изолированных участках, в пределах которых, как и в докембрии, цианобактериальные маты осаждают карбонаты и железо. Всестороннее изучение входящих в состав этих матов микроорганизмов позволит глубже понять природные условия архея и протерозоя и установить механизм образования джеспилитов.

Исследования осуществлены в ходе выполнения работ по проекту № 2.1.1/14299 «Изучение феномена „голубых” озер гумидной зоны», финансируемому по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2011 гг.)» Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] Беляков В. П., Скворцов В. В. Макро- и мезобентос, их продукция // Особенности структуры экосистем озер Крайнего Севера. 1994. С. 183—202.
- [2] Геологический словарь. Т. 1. М.: Недра, 1978. С. 487.
- [3] Гросс Г. А. Условия образования основных типов докембрийских железистых формаций // Геология и генезис железисто-кремнистых и марганцевых формаций мира / Ред. Н. П. Семененко. Киев: Наукова думка, 1972. С. 71—78.
- [4] Заварзин Г. А. Становление биосферы // Вестн. РАН. 2001. Т. 71. № 11. С. 988—1001.
- [5] Заварзин Г. А. Становление системы биогеохимических циклов // Палеонтологический журнал. 2003. № 6. С. 16—24.
- [6] Заварзин Г. А., Крылов И. Н. Цианобактериальные сообщества — колодец в прошлое. М.: Природа, 1983. № 3. С. 34—43.
- [7] Зенова Г. М., Штина Э. А., Дедьши Н., Глаголева О. Б., Лихачева А. А., Грачева Т. А. Экологические связи водорослей в биоценозах // Микробиология. 1995. Т. 64. № 2. С. 149—164.
- [8] Как растут кристаллы — магазин Подарки из камня. www.podarki33.ru
- [9] Карпов Г. А., Жегалло Е. А., Лупкина Е. Г., Орлеанский В. К. Биоморфная ультраструктура гейзерита: причины образования, следствия, генезис. <http://www.net.ru/ivs/publication/volcday/2007/art23.pdf>

- [10] Кузин И. Л. Глиняный диапиризм — важная составная часть новейшего тектогенеза Западной Сибири // Региональная неотектоника Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. С. 35—48.
- [11] Кузин И. Л. О приоритете в изучении поверхностных газопроявлений в Западной Сибири // Геология и геофизика. 1990. № 9. С. 142—144.
- [12] Кузин И. Л. Голубые озера областей гумидного климата // Изв. РГО. 2001. Т. 133. Вып. 3. С. 44—51.
- [13] Кузин И. Л. О геологической роли синезеленых водорослей и природных условиях докембрия // Изв. РГО. 2007. Т. 139. Вып. 2. С. 48—64.
- [14] Намсараев З. Б. Микробные сообщества щелочных гидротерм // Дис. канд. биол. наук. М., 2003. 151 с.
- [15] Нестеров И. И., Генералов П. П., Подсосова Л. Л. Западно-Сибирская провинция кремнисто-опаловых пород // Советская геология. 1984. № 3. С. 35—40.
- [16] Соколов Б. С. Органический мир Земли на пути к фанерозойской дифференциации // Вестн. АН СССР. 1976. № 5. С. 31—45.
- [17] Соколов Б. С., Федонкин М. А. Проблемы эволюции. [http // www. evolbiol. ru / fedonkin. Htm](http://www.evolbiol.ru/fedonkin.htm)
- [18] Технология производства синтетических опалов и их имитаций. [http: // www.webois. org.ua/jewellery/stones/sinteticab.htm](http://www.webois.org.ua/jewellery/stones/sinteticab.htm)
- [19] Фролов В. Т. Литология. Кн. 1. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с.

Санкт-Петербург
onyak@mail.ru

Поступило в редакцию
17 февраля 2011 г.

Изв. РГО. 2012. Т. 144. Вып. 3

© Е. В. ТРОФИМОВА

КАРСТ ПРИРОДНОГО ПАРКА «ЛЕНСКИЕ СТОЛБЫ» — УНИКАЛЬНОЕ ПРИРОДНОЕ ЯВЛЕНИЕ

Введение. С середины прошлого века, с работ Дж. Корбеля [11], среди карстологов прочно укоренилось представление о развитии карстовых процессов в холодных климатических условиях. В то же время трудами российского географа С. С. Коржуева [3—5] в мировую карстологию было введено понятие мерзлотного карста, под которым понимаются явления и формы, возникающие в области распространения многолетнемерзлых пород и развивающиеся при отрицательном температурном режиме ([9], с. 71).

Настоящая работа представляет результаты исследований, целью которых было изучение особенностей проявления мерзлотного карста на территории природного парка (ПП) «Ленские Столбы», номинируемой в Список объектов мирового природного наследия ЮНЕСКО.

Физико-географические особенности территории. Природный парк «Ленские Столбы» расположен в среднем течении р. Лена, географические координаты: 60° 06' 30" — 61° 17' 13" с. ш. и 124° 59' 33" — 128° 53' 00" в. д., на площади 1272 150 га. Орографически район исследований принадлежит к Прилен-