

Глава 7. КРУПНЕЙШИЕ ОЗЕРА ВЫСОКИХ ШИРОТ

В данной главе описываются три озера, расположенные в высоких широтах, в приполярных областях Земного шара, ограниченных 66 градусом. Это два крупнейших российских арктических озера – Таймыр и Имандра и антарктическое оз. Восток. Необходимо отметить, что количество крупных озер высоких широт, расположенных в пределах северного полушария, несколько больше. Однако в данной книге рассматриваются лишь два из них, являющиеся результатом многолетних исследований российских ученых-лимнологов и представляющие собой уникальные экосистемы. Наряду с выше названными, к крупнейшим озерам высоких широт можно также отнести канадские озера Неттилинг (5542 км²) и Амаджуак (3058 км²), Такиюак (1030 км²), Контуойто (933 км²), Тешекпук (820 км²), финское оз. Инари (1043 км²), а среди российских озер - также Топозеро (986 км²) и оз. Хангайское (880 км²).

Антарктическое оз. Восток - крупнейший резервуар чистой воды на Земле. Несмотря на то, что сведений о нем пока очень мало, в силу его уникальности не включить его в число Великих Озер мира просто невозможно. Ведущая роль в открытии оз. Восток принадлежит российскому ученому, предсказавшему существование подледных озер в Антарктиде ещё в 1960-70-х гг. Однако широкую известность это открытие получило только в 1996 г., после публикации в журнале “Nature” совместной статьи российских и британских полярников. Открытие оз. Восток заслуженно рассматривается как последнее крупнейшее географическое открытие XX века.

7.1. ОЗЕРО ТАЙМЫР

Озеро Таймыр является единственным водоемом значительных размеров, расположенным далеко на севере на границе арктической и субарктической зон. Его координаты 73°47' - 75°07' с.ш., 100°17' - 105°50' в.д. Его географическое положение в центре почти необитаемых тундр Таймырского полуострова было причиной того, что долгое время озеро оставалось неисследованным. Первые экспедиции на озеро были организованы только в 1943 г., хотя первые геологические экспедиции датируются 1920-ми годами.

Бассейн озера с реками Верхней и Нижней Таймырой располагается между 73 и 76° с.ш. и 92 и 108° в.д. на территории Таймырской низменности в зоне мохово-лишайниковой и кустарниковой тундры в районе вечной мерзлоты. С юго-востока границей его служит водораздел с бассейном р. Хатанги, с юга – водораздел с бассейном р. Дудыпты и с запада – водораздел с бассейном р. Пясины. Площадь водосбора 90800 км². В сравнительно недавнем прошлом бассейн озера находился в зоне морской трансгрессии.

Таблица 7.1 Морфометрические показатели озера Таймыр

Характеристики	Значения
Высота над уровнем моря, м	3
Площадь зеркала, км ²	4560
Объем водной массы, км ³	13
Максимальная глубина, м	26
Средняя глубина, м	4.6

Само озеро занимает обширную котловину, лежащую с севера у подножья крутых склонов плато Бырранга, здесь берега озера скалистые и круто спускаются к воде. Южный же берег слагается мягкими четвертичными отложениями – галечными, глинистыми, песчаными. В широтном направлении озеро простирается на расстояние 160-170 км и является сильно расширенным участком реки Верхней Таймыры, заполнившей тектоническую трещину, образованную в период таяния ледникового щита (Грезе, 1947). Озеро имеет четыре хорошо выраженных плеса (рис. 7.1).

Наиболее крупным притоком озера является р. Верхняя Таймыра, а также реки Яму-тариди, Хелиди-тари и ряд второстепенных мелких притоков, впадающих в озеро на южном берегу. Сток из озера осуществляется через Нижнюю Таймыру, впадающую в Таймырский залив Карского моря. Климат в окрестностях озера теплее, чем на окружающих тундровых территориях, поскольку расположенные с его северной стороны горы изолируют озерную котловину от холодных ветров с моря. В летнее время в районе озера температура воздуха иногда поднимается до 21-25°С. При этом среднемесячная температура поверхностного слоя воды в самый теплый месяц (август) в 1978-1980 гг. составляла лишь 6.6-8.1°С.

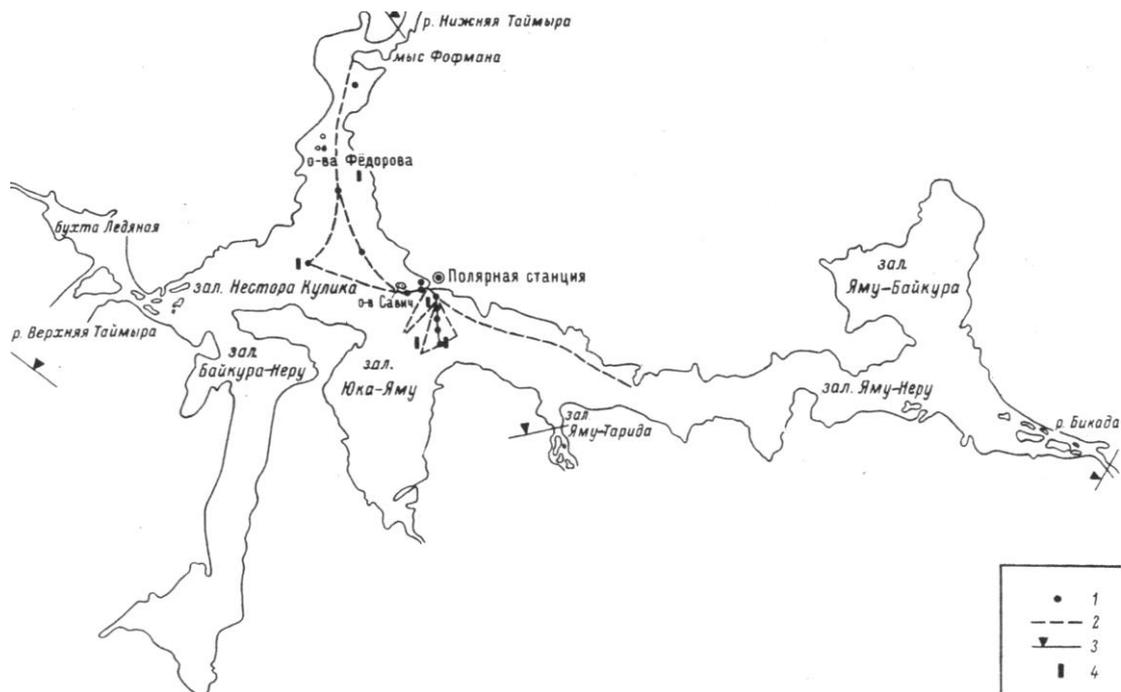


Рис. 7.1. Оз. Таймыр. Источник: География оз. Таймыр, 1985.

Озеро питается преимущественно талыми водами, которые приносят многочисленные реки из-за чего прозрачность воды низкая и по диску Секки составляет всего 0.3-1.8 м, а количество взвешенных веществ достигает 13.6 мг/л. Около девяти месяцев озеро покрыто льдом, причем значительная его часть (до 80%) промерзает до дна. Озеро наполняется водой только весной, и до 75% воды теряет к следующей весне, что связано с отсутствием грунтового питания. Отсюда уровень озера подвержен значительным колебаниям, амплитуда которых достигает в среднем 5 и более метров (География озер..., 1985).

Тенденции современного изменения режимов тепла и влаги позволяют ожидать увеличения тепло- и влагообеспеченности в районе оз. Таймыр, хотя в последнее время преобладающими были тенденции уменьшения увлажнения на территории водосборного бассейна.

Озеро является мелководным, почти 80% всей его акватории составляют мелководья с глубинами не более 5-6 м. Глубоководная область озера расположена между бухтой Ожидания и заливом Юка-Яму (рис. 7.1).

В озере Таймыр, также как и в озере Хазен,

самом северном озере мира, полностью отсутствует высшая водная растительность. Однако в отличие от указанного озера в оз. Таймыр наблюдалось достаточно высокое количество фосфора (до 49 мкг Р/л на поверхности и 73 мкг Р/л у дна), что очевидно объясняется влиянием коренных пород пермского возраста. Такая концентрация фосфора сказалась на развитии планктонных организмов. Исследования, проведенные в 1980 г., показали, что в августе в планктоне озера наибольшего разнообразия достигают диатомовые водоросли, представленные 23 видами и разновидностями. Кроме того, обнаружено 3 вида зеленых, 2 вида синезеленых и 2 вида золотистых. Наибольшего разнообразия достигают диатомовые водоросли, представленные 23 видами и разновидностями. К доминирующим видам можно отнести *Asterionella formosa*, *Melosira italica*, *M. italica var. tenissima*, *M. islandica subsp. helvetica* (Щур, Сидько, 1985). Более ранние исследования также указывали на доминирующее положение диатомовых, полное отсутствие десмидиевых и слабое развитие протококковых и синезеленых (Грезе, 1957). Количество хлорофилла и фитопланктона в озере имеют хорошо выраженную вертикальную стратификация на всех станциях, несмотря на небольшие глу-

бины. Максимум величины биомассы отмечен в слое 0.5-1.0 м, а максимум хлорофилла «а» - на глубине более 1 м. Биомасса фитопланктона в среднем в столбе воды составляла 0.4-1.0 г/м³, а величины хлорофилла «а» - 0.2-0.4 мг/м³, причем эти данные были получены при ежедневном отборе проб в течение 5 суток (1980 г.), что говорит об их большой изменчивости. Низкие значения концентрации хлорофилла при сравнительно высоком содержании биомассы очевидно обусловлены низкими значениями температуры воды. Первичная продукция в озера составляла 1.09-2.64 мкг С/л в сутки, превышая почти в 100 раз продукцию фитопланктона в оз. Хазен (Румянцев и др., 2010). Зимой фитопланктон практически отсутствовал.

Зоопланктон в оз. Таймыр состоит из 3 групп организмов – коловраток (38 видов), кладоцер (13) и копепод (19). Реликтовое происхождение озера обуславливает присутствие в нем комплекса реликтовых видов таких как *Limnocalanus macrurus*, *Eurytemora gracilis* (Грезе, 1957). Качественно зоопланктон беден по всей акватории озера, но количественно в различных участках озера неодинаков. Так, биомасса зоопланктона изменялась от 13.6 мг/м³ в заливе Яму-Неру до 253.3 мг/м³. Средняя биомасса зоопланктона в период открытой воды составляет 0.23 г/м³, а зимой в 4 раза меньше (0.05 г/м³) (Романов, Тюльпанов, 1985).

Основу кормовой базы обитающих в озере рыб составляют донные организмы. Наиболее заселен озерный ил, который характеризуется наиболее высокой численностью (2882 экз./м²) и биомассой (5.14 г/м²) бентофауны. В основном она представлена на 97% олигохетами, амфиподами и личинками тендипедид. В озере также обнаружен комплекс форм морского происхождения *Pontoporeia affinis*, *Pallasea quadrispinosa*, *Gammaracanthus lacustris*, *Mysis oculata relictata*, присутствие этого комплекса также подтверждает реликтовый характер озера. Песчаные грунты занимают прибрежную (0-3 м) зону, которая занимает 26% общей площади дна озера и большей частью промерзает зимой, поэтому плотность бентосного населения здесь достаточно низкая – численность 160 экз./м² и биомасса 0.26 г/м² с преобладанием личинок хирономид (47%). То же можно сказать о заиленном песке, который занимает 31% площади (глубины 2.5-5 м). Здесь отмечены явления анабиоза некоторых организмов (личинок хирономид, червей). Зона

илистых грунтов, расположенная на глубинах 5-15 м, характеризуется наибольшим разнообразием донной фауны и наибольшими показателями биомассы, достигающей здесь 4.6 г/м², большую часть биомассы составляют олигохеты и амфитоды. Из последних в массовом количестве размножаются *Pontoporeia affinis* и, слабее, *Pallasea quadrispinos*. Здесь также встречаются моллюски, которые вносят значительный вклад в общую биомассу (Грезе, 1957).

Ихтиофауна озера генетически молода. Она представлена 20 видами и формами, относящихся к проходным, полупроходным, озерно-речным и озерным рыбам. Рыбы, относящиеся к проходным и полупроходным формам, нагуливаются в солоноватых водах Таймырского залива и в прибрежье Карского моря, на нерест поднимаются в Нижнюю и Верхнюю Таймыру и их притоки. Для самого озера характерно 10 видов, представленных исключительно холоднолюбивыми рыбами. Особенностью ихтиофауны озера является большое число форм рода *Coregonus* – сибирская ряпушка, омуль, сига, муксун, чир, пелядь, которые являются главными промысловыми рыбами. Голец представлен двумя видами, один из которых является эндемиком - озерный голец (*Salvelinus taimyricus* Michin.). Проходной голец – также ценная промысловая рыба. По расчетам общая рыбопродуктивность озера составляет 7.7 тыс. т, а эксплуатационная – 230 т. В 1980-е годы добыча превысила 500 т, что отрицательно сказалось на рыбных запасах. Довольно низкая рыбопродуктивность определяется суровыми условиями обитания и довольно низкой кормовой базой. Запасы зообентоса ограничены, что приводит к межвидовой конкуренции, особенно выраженной у сига и чира в весенне-летний период, когда эти рыбы в поисках пищи заходят на низкие заливные тундровые участки побережья. Бентосоядные муксун и сиг в условиях оз. Таймыр питаются планктоном (Михин, 1955). Лососевые и сиговые оз. Таймыр и его бассейна, приспособившиеся в результате эволюции к исключительно суровым условиям обитания и давшие ряд уникальных, нигде больше не имеющих форм, представляют собой бесценный фонд для рыбоводства и селекции, который необходимо сохранять для будущего (Романов, Тюльпанов, 1985).

В 1983 г. озеро вошло в состав Таймырского заповедника, что позволит рационально использовать промысловые рыбные запасы.

7.2. ОЗЕРО ИМАНДРА

Озеро Имандра является самым большим озером на Кольском полуострове. Оно находится на крайнем северо-западе Европейской территории России в Мурманской области и расположено в депрессии, отделяющей Кольской полуостров от материковой части. Его координаты 67°21' - 68°04' с.ш. и 31° 52' - 33° 27' в.д. Интенсивное освоение природных богатств Крайнего Севера и в частности Кольского полуострова не могло ни затронуть уникальные свойства озера Имандра, а также его крупнейшие рыбные запасы. Озеро, как и все северные экосистемы, чрезвычайно уязвимо к антропогенному воздействию. Это одно из немногочисленных водоемов Крайнего Севера, для которого имеются многолетние ряды наблюдений по основным звеньям экосистемы, позволяющие не только оценить, но и прогнозировать сокращение техногенного ущерба на природные озерные экосистемы. В вышедшей в 2002 г. книге «Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра» были обобщены многолетние данные по озеру и ее водосбору.

Котловина оз. Имандра расположена среди кристаллических образований архейского и нижнепротерозойского возраста. Она имеет тектоническое происхождение и непосредственно связана с Хибинским массивом. Основные тектонические линии в рельефе водосбора озера, наметившиеся еще в момент образования, сохранились до настоящего времени. Двигавшиеся по направлению тектонических разломов ледники расширили и несколько деформировали первичные трещины, придав более мягкие очертания всему рельефу.

Для озера характерно многообразие берегов. Скалистые берега распространены там, где к берегу примыкают возвышенности. Валунные берега наиболее распространены, и к ним относятся так называемые корги – каменные мели, состоящие из нагромождения валунов и глыб в открытой части озера. Песчаные берега имеют значительно меньшее распространение, чем скалистые и валунные. Обычным явлением являются болотно-торфяные берега.

Климат региона находится под смягчающим влиянием окружающих область морей и особенно запасов тепла, приносимого северной ветвью теплого течения - Мурманским прибрежным течением. Зима здесь продолжается в течение семи месяцев (октябрь – апрель). В районе Имандры средняя месячная темпе-

ратура воздуха в январе и феврале равна соответственно 12.6 и 12.8° С. В зимний период характерны оттепели. В июле самая низкая температура воздуха была -2° С, а самая высокая + 32° С. Лето короткое: период со средней суточной температурой выше 10°С составляет 71-74 дня. Территория оз. Имандра является зоной избыточного увлажнения вследствие низкой испаряемости влаги. Годовое количество осадков в Имандре в зависимости от района составляет 414-481 мм.

Таблица 7.2. Морфометрические показатели озера Имандра

Характеристики	Значения
Высота над уровнем моря, м	126.7
Площадь зеркала, км ²	812
Общая площадь озер (с островами), км ²	880.4
Объем водной массы, км ³	10.9
Максимальная глубина, м	67
Средняя глубина, м	13.3
Площадь водосбора, км ²	12 300

Продолжительность открытого периода составляет 160 дней. Максимальная температура воды на поверхности, как правило, была в июле (до 19.5°С). Для озера характерно ветровое перемешивание водной массы, что приводит к выравниванию поверхностной и придонной температур. В очень теплые годы возникает вертикальная стратификация, однако только в редких случаях слой скачка сохраняется дольше одной декады. Сильное ветровое перемешивание в осеннее время вызывает значительное выхолаживание водной массы озера, и к началу ледостава средняя ее температура снижается до 1.0-0.5 °С (Варенцов, 1975).

В озере находится более 140 островов, наиболее крупный из них – Ермозеро (26 км²). Глубины у берегов озера довольно резко увеличиваются и часто на расстоянии 250-300 м от берега достигают 10-12 м, поэтому литораль выражена слабо, и только в северной и южной части озера она несколько шире. Озеро состоит из трех в значительной мере обособленных плесов: Большая Имандра, Йокостровская и Бабинская, характеризующихся различными глубинами и показателями открытости и емкости (рис. 7.2). Плес Большая Имандра по

площади водного зеркала уступает Йокостровской Имандре (соответственно 311.6 и 352.2 км²), но является самой глубокой частью озера с максимальной глубиной 67 м. В Большой Имандре глубины 20-25 м занимают всего 12.3% площади, глубины 15-20 м – 36.4% (рис. 7.3). В Йокостровском плесе наибольшую площадь занимают глубины 5-10 м (25.3%), максимальная глубина здесь 42 м. Плес Бабинская Имандра с площадью зеркала 148.7 км² по глубинам занимает среднее положение между Большой и Йокостровской Имандрой. Здесь наибольшую площадь занимают глубины 10-15 м (25.2 %) и 15-20 м (20.4%), а максимальная глубина - 43.5 м. (рис. 7.4). Из Йокостровского плеса берет начало река Нива, впадающая в Кандалакшский залив Белого моря. С созданием в 1952 г. ГЭС на р. Ниве (сейчас это каскад ГЭС) озеро Имандра стало водохранилищем многолетнего регулирования. Размах колебания уровня – 200-2005 см. С 1973 г. благодаря вводу Кольской АЭС, сработка уровня воды каскадом Нивских ГЭС не превышает 1.5 м.

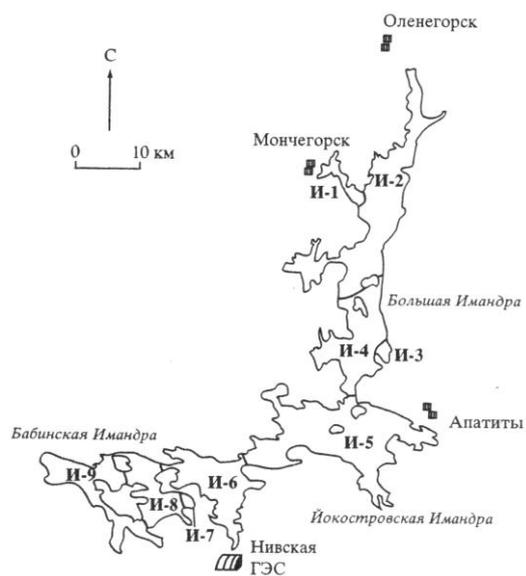


Рис. 7.2. Районирование оз. Имандры. Источник: Антропогенная модификация ... , 2002

Наличие уникальных месторождений полезных ископаемых и удобное расположение основных транспортных магистралей способствовало развитию в регионе мощного индустриального комплекса. Интенсивное освоение месторождений началось в 1930-1940 гг. Среди основных производств выделяются следующие: горнодобывающая промышленность (ОАО «Апатит»,

города Апатиты и Кировск), металлургическая промышленность (Кольская ГМК, ОАО «Североникель», г. Мончегорск), железорудное производство (ОАО «Олкон», г. Оленегорск), энергетический комплекс (Кольская АЭС, Апатитская ТЭЦ, каскад Нивских ГЭС). Озеро загрязняется как в результате различных по характеру стоков, так и за счет выпадения загрязняющих веществ из атмосферы. В озеро поступают в основном сульфаты, хлориды, фториды, фосфаты, нефтепродукты, органические вещества. Сточная вода, поступающая в озеро, крайне загрязнена тяжелыми металлами - никелем, железом, медью (Моисеенко и др., 1997). Выбросы сернистого газа привели к закислению водосбора. На водосборе озера проживает более 300 тыс. человек, что составляет почти 35 % от общего числа жителей Мурманской области.

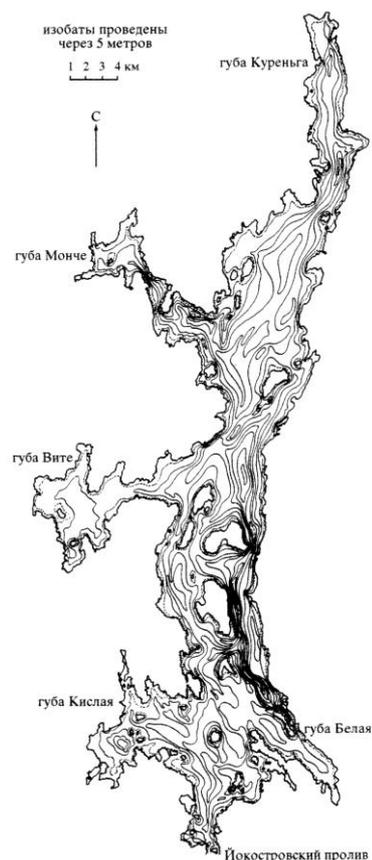


Рис. 7.3. Батиметрическая карта Большой Имандры. Источник: Антропогенная модификация ... , 2002

Довольно полные гидрохимические исследования 1920-1930 гг. дают возможность представить природный фон озера (Рихтер, 1934, Семенович, 1940). До начала работымыш-



Рис. 7.4. Батиметрическая карта Йокостровской и Бабинской Иmandры. Источник: Антропогенная модификация ... , 2002

ленного комплекса озеро отличалось низкой минерализацией – 20-30 мг/л и относилось к гидрокарбонатно-натриевому типу. Доминирующую роль в снабжении озерной воды натрием, кальцием и магнием играли процессы химического выветривания силикатов и алюмосиликатов, а калием - нефелиновые сиениты. По содержанию биогенных элементов озеро характеризовалось как олиготрофное, насыщенные воды кислородом было высоким и даже у дна не снижалось ниже 60-80 %, величина рН колебалась в пределах 6.4-7.2, перманганатная окисляемость – 3-5 мгО/л, прозрачность воды достигала 6.5-11 м. В настоящее время (данные 1993-1998) даже в относительно не загрязненном плесе Бабинская Имандра минерализация воды составляет 45 мг/л, а в наиболее загрязненном плесе Большая Имандра – 72 мг/л. Вода стала относиться к классу сульфатов и только в плесе Бабинская Имандра содержание гидрокарбонатов выше, чем сульфатов. Во всем озере величины рН колебались в пределах 7.06-7.30. Прозрачность воды изменялась от 3 м в Большой Имандре до 6 м в Бабинской. В зимний период в толще воды отмечался дефицит кислорода. Величина перманганатной окисляемости мало изменялась по зонам и за весь период исследований и в среднем за последние 10 лет по озеру составляла 3.5 мг О/л.

В настоящее время содержание общего фосфора соответствует природному только в плесе Бабинская Имандра (5-13 мкг Р/л). В плесе Большая Имандра, наиболее подверженному загрязнению, концентрация общего фосфора в

отдельные годы достигала 80-130 мкг Р/л, а в районе поступления сточных вод предприятия «Апатит» даже до 200-300 мкг Р/л. В Йокостровской Имандре концентрация общего фосфора колеблется в пределах 6-26 мкг Р/л. Максимальные значения общего азота в озере наблюдались в 1991-1992 гг. - 400-650 мкг/л, в последующие годы эти значения снизились в Большой Имандре до 200-400 мкг/л, в других плесах были не выше 300 мкг/л. По соотношению азота и фосфора можно говорить о возможных процессах эвтрофирования в плесе Большая Имандра (Моисеенко и др., 2002).

Высшая водная растительность в озере очень бедна. Крутой уклон дна, преобладание в литорали песчано-каменистых грунтов мешают развитию макрофитов даже в заливах. Отдельные очень разреженные группировки тростника и хвоща были обнаружены в некоторых заливах главного плеса.

В озере отмечено большое видовое разнообразие фитопланктона, обнаружено 234 таксона водорослей рангом ниже рода. До периода интенсивного освоения территории водосбора и развития промышленных предприятий в фитопланктоне преобладали десмидиевые и диатомовые водоросли (Воронихин, 1935). Летом 1960 г. в планктоне плеса Большая Имандра уже было отмечено массовое развитие не только диатомовых, но и синезеленых (Петровская, 1966). В настоящее время в районах, отдаленных от промышленных выбросов, фитопланктон преимущественно представлен диатомовыми, динофитовыми и золотистыми водорослями, наиболее

массовыми видами являются *Peridinium cinctum*, *P. aciculiferum*, *Dinobryon bavaricum*, *Aulacoseira italica*, *Tabellaria fenestrata*, *Asterionella formosa*, *Ceratium hirundinella*, *Rhizosolenia longiseta*. В загрязненных районах озера кроме диатомовых преобладают синезеленые, кроме того, в доминирующей группе появились криптофитовые и вольвоксовые водоросли, как правило, массовыми видами являются *Limnithrix planctonica*, *Phormidium tenue*, *Cryptomonas* sp., *Aulacoseira islandica*, *Stephanodiscus rotula*, *Eudorina elegans*, *Pandorina morum*. В озере формируются нетипичные для субарктики фитоценозы и ограничено развитие арктических видов. Распределение фитопланктона по акватории озера определяется прежде всего обеспеченностью биогенными элементами. В плесе Большая Имандра биомасса фитопланктона колебалась в пределах 1.5 - 3.0 г/м³, содержание хлорофилла «а» - 4 – 8 мг/м³. По этим показателям Большую Имандру можно отнести в мезотрофному типу, за исключением более эвтрофных губ Монче и Белой, подверженных влиянию хозяйственных и промышленных стоков. В других плесах эти величины соответственно составляют 0.7-1.1 г/м³ и 1-3.5 мг/м³, что соответствует олиготрофному озеру (Шаров, 2002).

Таксономическая структура зоопланктонного сообщества – хороший индикатор степени загрязнения водоема в целом и его отдельных участков. Для озера характерен обедненный состав зоопланктона, который изучался с конца 19-го века, но наиболее полно исследовался в 1940-1975 и 1981-1996 гг. (Семенович, 1940, Дольник, Стальмакова, 1975, Вандыш, 2002). Обнаружено 25 видов организмов, из них коловраток – 10, кладоцер – 7, копепоид – 8. Коловратки *Asplanchna priodonta*, *Kellicottia longispina*, *Keratella cochlearis*, *K. quadrata* наиболее устойчивы к влиянию сточных вод промышленных производств. С удалением от источников загрязнения отмечен рост доли ветвистоусых и веслоногих ракообразных (*Daphnia cristata*, *Cyclops scutifer*, *Mesocyclops leuckarti*) и развитие наиболее чувствительных к загрязнению каланоид (*Eudiaptomus gracilis*, *Heterosira appendiculata*). Биомасса зоопланктона изменялась от 1.26-2.91 г/м³ в Большой Имандре до 0.67-1.0 в Йокостровской и Бабинской Имандре.

В настоящее время профундальный зообентос, также как и в течение всех предыдущих периодов исследования, был представлен

личинками хирономид, малощетинковыми и круглыми червями, двусторчатыми моллюсками, бокоплавами и водными клещами. Всего в зообентосе профундальной зоны было найдено 42 вида и форм беспозвоночных, среди которых по количеству видов (27 видов) доминировали личинки хирономид. По значениям биомассы зообентоса плес Большая Имандра соответствует бета-эвтрофному водоему, плес Йокостровская Имандра – альфа-эвтрофному, а плес Бабинская Имандра – бета – олиготрофному водоему. Среднее значение биомассы зообентоса по площади акватории составляет около 14 г/м², что позволяет в современный период рассматривать оз. Имандра как альфа-эвтрофный водоем. В 1930 г. средние значения биомассы зообентоса были значительно ниже – 1.1-1.4 г/м² (Крохин, Семенович, 1940, Дольник, Стальмакова, 1975, Ильяшук, 2002). В 1990-е годы среди групп беспозвоночных доминировали ракообразные, представленные реликтовым бокоплавом *Monoporeia affinis*, причем его численность увеличилась в 2-5 раз по сравнению с периодом пятнадцатилетней давности, что говорит об его устойчивости к загрязнению в отличие от *M. relictata*, которая полностью выпала из состава фауны. По численности и биомассе зоопланктон и зообентос озера могут обеспечить их главных потребителей – ряску, корюшку (планктонофаги) и сига (бентософаги).

В современный период в оз. Имандра обитают 15 видов рыб. Наиболее ценными промысловыми видами являются кумжа, голец, ряска, сиг, хотя и другие виды без сомнения играют важную роль в сообществе рыб – это корюшка, налим, голяк, колюшка, ерш. Рыбная часть в результате интенсивной антропогенной нагрузки претерпела существенные изменения. В природном состоянии это был сигово-гольцовый водоем. В настоящее время преобладают только сиговые, значительно сократилась численность голяка и кумжи. В зонах загрязнения у рыб наблюдаются массовые патологии и дисфункции в системах организма.

Озеро Имандра является одним из немногих озер, на котором проводятся многолетние мониторинговые наблюдения, которые осуществляет Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Установлено, что в настоящее время происходит некоторое уменьшение антропогенной нагрузки на озеро в связи с переходом ряда производств на новые технологии, но этот процесс происходит очень

медленно, и качество озерной воды остается по-прежнему неблагоприятным.

7.3. ОЗЕРО ВОСТОК

Оз. Восток – крупнейшее подледное озеро в Антарктиде, расположенное в районе антарктической станции Восток (рис. 7.5). Примерные координаты: 76°-78°30' ю.ш.; 106°-110° в.д. Озеро находится под ледяным щитом мощностью 3500-4000 м. Оно занимает обширное понижение земной коры длиной около 300 км, шириной от 40 до 80 км, которое вытянуто в меридиональном направлении и имеет слегка изогнутую, коленчатую, форму. Приблизительная площадь озера 15690 км².

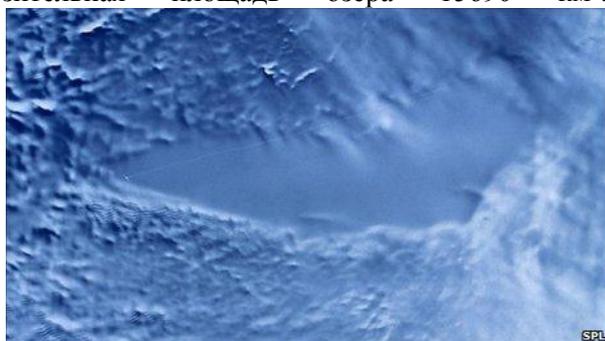


Рис. 7.5. Озеро Восток, снимок NASA/

Согласно оценкам, основанным на результатах сейсмического зондирования, восточный берег озера почти прямолинейный, тогда как западный сильно изрезан, в его юго-западной части имеется бухта округлой формы, вдающаяся в сушу на расстояние примерно 10 км, в северо-западной части, на расстоянии около 170 км от ст. Восток, обнаружена целая система бухт и мысов. На возвышенности западного побережья обнаружены глубокие (более 400 м) и узкие (до 2 км) каньоны. Береговые склоны с обеих сторон озера представляют собой крутые уступы высотой до 1500 м, часто осложняющиеся небольшими ступенями. Такие же уступы замечены и внутри самого озера на сейсмическом профиле, пересекающем самую южную его оконечность. В этой части на дне озера с помощью сейсмических исследований обнаружена осадочная толща мощностью до 200—400 м. Озеро разделено на две части подводным гребнем. Глубина северной части составляет около 400 м, южной — около 800 м; глубина над гребнем порядка 200 м (Котляков, 2004, Таллай, 2005). Две глубоководные зоны,

северная и южная, соединены мелководной перемычкой (рис. 7.6).

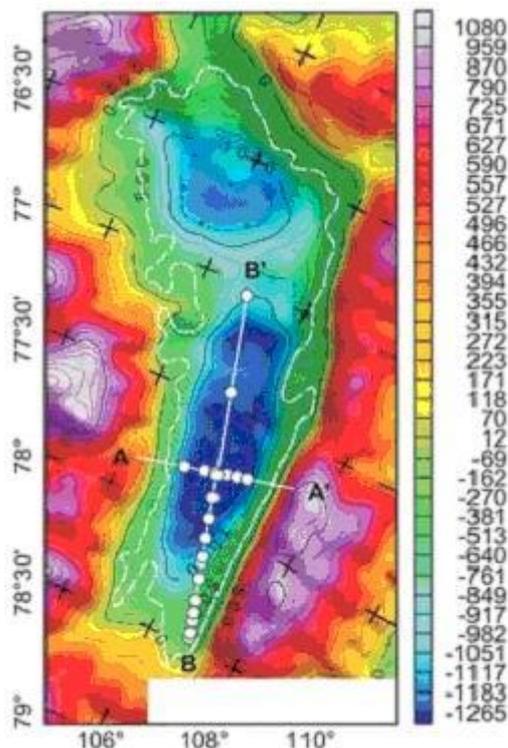


Рис. 7.6. Рельеф дна оз. "Восток" по данным сейсмического зондирования. (источник Талалай, 2005).

Толщина льда в разных частях озера составляет от 3800 м на севере до 4250 м на юге, перепад высот границы раздела составляет около 400 м, тогда как на поверхности ледника перепад высот всего около 40 м. С более высокой северной стороны лёд тает, а с южной — намерзает.

Озерная котловина имеет тектоническое происхождение, ее возраст оценивается приблизительно в 35 млн. лет. Касаясь вероятного сценария происхождения озера, ученые-полярники указывают на наличие под ложем водоема глубинных геологических разломов, пронизывающих всю земную кору вплоть до мантии (Зотиков И.А., 2000). Ширина впадины, занимаемой оз. Восток, значительная амплитуда смещений блоков горных пород, ограничивающих озеро, и их ступенчатая форма, очевидно, связанная с растяжением земной коры, так же как и коленчатая конфигурация и картина развития разломов на западном берегу озера свидетельствуют в пользу того, что озеро расположено в рифтовой зоне. Впадина оз. Восток, расположена в 400 км от продолжения зоны ледника Ламберта параллельно ее основ-

ному направлению, и может представлять собой отдельное звено единой крупной рифтовой системы.

История открытия и научных исследований

Существование подлёдных озёр в Антарктиде было предсказано ещё в 1960-70-х гг. Однако широкую известность это открытие получило только в 1996 г., после публикации в журнале “Nature” совместной статьи российских и британских полярников об озере Восток (Kapitsa et al., 1996).

Еще в конце XIX в. П.А. Кропоткин (1876), высказал предположение, что в толще больших и холодных сверху ледников температура, так же как и в других горных породах, с глубиной повышается. Исходя из этого положения, в 1950-х гг. океанолог Н. Н. Зубов ввёл понятие критической толщины ледника, при которой, при соответствующем давлении, у его дна достигается температура плавления льда. При этом он признавал тот факт, что толщина реального антарктического покрова в некоторых местах, по результатам обработки сейсмических данных, была гораздо больше критической толщины (Зубов, 1956). Для объяснения этого факта он предположил, что внутри ледяного щита должен существовать изотермический слой, например из смеси воды и льда, толщина которого должна быть равна разнице между измеренной толщиной и расчетным критическим значением. В своих выводах Зубов опирался на предположение, что температура линейно повышается с глубиной. В 1959 г. Капица, используя метод Зубова, сделал предположение о наличии линз воды под толщей воды в Зубовском изотермическом слое, в центральной части ледникового покрова Антарктиды (Капица, 1961).

В 1955 г. английский гляциолог Гордон Робин (Robin, 1955) обнаружил, что температура льда повышается с глубиной от ее среднего многолетнего значения (-18°C) у поверхности до температуры замерзания морской воды (1.8°C) у границы «дно ледникового покрова-море». Однако это изменение не было линейным, как считал Зубов. Температура очень медленно повышалась в верхней части шельфового ледника, и стремительно увеличивалась в нижней. Это означало, что тепло переносится вертикально не только благодаря теплопроводности, но и за счет постоянного вертикального движения холодных частиц вниз, к

дну ледника. Толщина льда в этих условиях остается постоянной за счет накопления снега на поверхности, приводящего к постоянному вертикальному конвективному движению холодного льда от поверхности к нижней более теплой части ледникового покрова. Свои расчеты Робин проводил для ледников Гренландии, поэтому, в силу их меньшей мощности, он не учитывал возможность постоянного таяния у дна, необходимого для существования подледниковых озёр.

В 1961 г. И. А. Зотиковым были проведены теплофизические расчёты, основанные на решении уравнения теплопроводности в леднике, рассматриваемом как движущаяся жидкость, был учтён и конвективный перенос холода сверху вниз. Анализируя на основе этих расчетов данные о ледниковом покрове центральной части Антарктиды, полученные в первых экспедициях, Зотиков обосновал возможность таяния на ложе ледника в центральной части Антарктиды. Его расчеты говорили о том, что часть тепла, поступающего к основанию ледникового покрова из недр Земли, постоянно затрачивается на таяние придонного льда, невзирая на царящий на поверхности холод. При этом появляющаяся вода выдавливается на те участки, где толщина льда меньше, и там вновь замерзает (Зотиков, 1962). Но в углублениях подледного ложа она может скапливаться и даже формировать перекрытые километрами льда резервуары воды — озера. Чуть позже Зотиков построил карту-схему областей непрерывного таяния у ложа Антарктического ледникового покрова, согласно которой под ледяным панцирем шестого континента разливается целое море пресной воды. Окрестности же станций «Амундсен— Скотт» (США), «Бёрд» (США) и «Восток» (СССР) он выделил как наиболее перспективные с точки зрения поиска подледных озёр (Зотиков, 1963). Первые реальные подтверждения гипотезы Зотикова были получены в 1968 г. в результате бурения самой глубокой в те годы двухкилометровой скважины на американской ст. Берд. Когда бур достиг дна ледника, в скважину хлынула пресная вода.

В 1959 и 64 гг. сейсмическое зондирование ледникового щита под ст. Восток, проведённое под руководством А. П. Капицы, позволило определить его толщину. При этом оказалось, что помимо главного пика отражения от дна ледника в приёмном сигнале выявлялся ещё

один. Тогда он был интерпретирован как отражение от нижней границы слоя осадочных пород под ледником. Только значительно позже, в 1994 г. была реинтерпретирована сейсмограмма, сейсмика очень четко зафиксировала Р-волну второго отражения и свидетельствовала о наличии слоя воды глубиной более 500 метров под толщей ледникового покрова.

В пользу существования подледного озера говорили и данные, полученные в 1993 г. со спутника ERS-1, орбита которого позволяла провести радарную съемку большей части Антарктиды. Данные были проанализированы английским ученым Д. Ридли. На снимках обозначилась крупная необычная форма рельефа в районе ст. Восток — это на ледниковом щите проступали очертания огромного водоема (рис. 7.5). Статья Ридли (Ridley et al., 1993) и его карта свидетельствовали о наличии предполагаемого озера, имеющего овальную форму. Практически в то же время в Кембридже было организовано совещание «Геофизическое изучение озера Восток», посвященное обсуждению научных проблем, связанных с существованием озера. Совещание рассмотрело существующий уровень знаний и предложило дальнейшее изучение вопроса, для расширения границ понимания этого «самого удаленного озера Земли» (Зотиков, 2010). В последствие, по результатам организованных Королевским обществом Великобритании и Российской АН совместных англо-российских работ в области интерпретации полученных по озеру данных, вышла статья об озере в журнале Nature, которая и принесла озеру широкую мировую известность. Причем окончательным подтверждением существования озера, позволившем опубликовать данную статью, явились, как раз, результаты реинтерпретации Капицей сейсмограмм, полученных им в 1960-х гг. Эти результаты были доложены Капицей на XXIII заседании СКАР в Риме в 1994 г.

Начиная с 1970-х гг. российскими учеными на ст. Восток ведется бурение льда с целью палеоклиматических исследований. С 1989 г. исследования проводились в рамках совместной экспедиции российских, французских и американских ученых. Начиная с 1975 г. в общей сложности отобрано более 3000 проб; в 89 случаях в них обнаружены микроорганизмы, среди которых имеются представители различных таксонометрических групп: прокариоты - неспорообразующие и спорообразующие бактерии и актиномицеты;

эукариоты - дрожжи и мицелиальные грибы (Талалай П., 2005). После подтверждения на XXIII заседании СКАР возможности существования озера Восток, российскими учеными в лице Котлякова было привлечено внимание всех делегатов СКАР от других стран к феномену озера и к программе бурения ледяного керна на станции Восток. К этому времени глубина скважины составляла более 2500 м при общей толщине льда 3750 м. В результате делегаты СКАР рекомендовали проводить бурение ледяного керна до глубины при которой не будет нарушена экологическая чистота озера и не проводить его ниже этой отметки до тех пор, пока не будет проведено углубленное научное изучение этого вопроса и оценка бурения на окружающую среду.

Начиная с глубины 3538 м, химический и изотопный состав льда и его кристаллографическая структура существенно изменились — оказалось, что этот лёд представляет собой замороженную воду. На кернах, вынутых с глубины 3538-3607 м, были видны инородные включения миллиметрового размера, которые могли бы принадлежать ложу ледникового покрова. Также в кернах содержались очень большие кристаллы льда, а его электропроводность была на два порядка ниже электропроводности предыдущих слоев (Зотиков, 2010). В результате изучения изотопного состава, измерений электропроводности и содержания газов во льду стало ясно, что самые нижние слои (3538-3539 м) состоят из льда, образовавшегося при замерзании воды оз. Восток (Jouzel et al., 1999). Считается, что 70-метровый слой (3538-3609 м), в котором видны посторонние частицы, замерз в условиях турбулентного перемешивания воды озера (Wuest and Carmack, 2000). В 1998 г. при глубине скважины 3623 м бурение было временно приостановлено, чтобы не допустить загрязнения воды, которое может повредить его уникальной экосистеме. Образцы льда с этой глубины имели возраст около 420 тыс. лет, поэтому предполагается, что озеро было закупорено льдом не менее 500 тыс. лет назад.

В рамках 52-ой Российской антарктической экспедиции 2006-07 гг. бурение было возобновлено. Согласно подписанному между Россией и США специальному соглашению оно проводилось в рамках программы с дальнейшим совместным использованием ледяного керна для научного изучения. За первое южно-полярное лето (февраль 2006 г.) были пройдены

еще 27 м скважины, и ее глубина была увеличена с 3623 до 3650 м. При каждом бурении, занимавшем около 6 часов, на поверхность поднималось около 1.6 м керна (Зотиков, 2010). Однако, с 2006 г. бурение скважины российскими специалистами начало вызывать неодобрение международного научного сообщества в связи с недоверием к экологической чистоте российского проекта. Несмотря на недоверие, в следующее лето (декабрь 2006 – январь 2007 гг.), буровые работы были возобновлены. Было пройдено еще 10 метров, но при достижении глубины 3658 м буровой снаряд застрял в скважине, и его извлечение потребовало массы времени и усилий. После ликвидации последствий аварии со снарядом было пройдено еще 9 метров, и скважина достигла глубины 3666 м. При проведении работ стало ясно, что для дальнейшего бурения необходима смена оборудования, прежде всего замена на буровой установке кабель-троса. Этот трос уже доставлен в Антарктиду и должен быть заменен в 2010 г. Кроме необходимости замены троса возникли новые сложности во время буровых работ 2008 г., производимых с использованием старого оборудования. Бур опять застрял, но в этот раз извлечь его не удалось, пришлось делать ответвление на глубине 100 м от брошенного бура, и было начато бурение новой скважины, которая достигла горизонта, где был брошен старый бур, но в стороне от него (Зотиков, 2010). К сожалению, возникшие трудности отняли много времени и изначальные планы по достижению поверхности озера в рамках Международного полярного года в сезоне 2008-09 гг. оказались сильно сдвинуты по времени. По состоянию на начало 2011 года скважина еще не достигла поверхности озера. В феврале месяце, по случаю окончания полярного лета, она была законсервирована, и буровой снаряд был остановлен на отметке 3720 м. Буровые операции в скважине планируется возобновить во второй половине декабря 2011 г. по программе работ 57-й Российской антарктической экспедиции (Озеро Восток..., 2011).

Забор озерной воды пока не произведен, хоть, по мнению российских специалистов (Зотиков, 2010), он может произойти в самое ближайшее время, во всяком случае, все технические возможности для этого на сегодняшний день существуют. Однако, необходимо иметь в виду, что мировое научное сообщество, прежде всего

в лице ASOS (Antarctic and South Ocean Coalition), продолжает всячески противодействовать дальнейшему бурению российской стороной, считая российский проект недостаточно экологически чистым. С соответствующими заявлениями ASOS неоднократно обращалась к России, в том числе к делегатам Государственной Думы (Appeal..., 2008).

Технология продолжения работ по проникновению в водный слой подледникового озера Восток будет строго соответствовать принципам, изложенным в «Заключительной Всесторонней ОВОС на отбор проб поверхностных вод из озера Восток», на которую 23 ноября 2010 года Российская антарктическая экспедиция получила Разрешение № 067 от уполномоченного Правительством РФ органа федеральной исполнительной власти. Отчёт о проделанной работе будет подготовлен исполнителями по возвращении в Санкт-Петербург и в дальнейшем представлен делегацией Российской Федерации на заседании XXXIV Консультативного совещания по Договору об Антарктике, которое пройдет в Буэнос-Айресе с 20 июня по 1 июля 2011 года (Озеро Восток..., 2011).

Основные биологические особенности

Оз. Восток на протяжении сотен тысяч лет находится в изоляции от земной биосферы, отрезанное от нее четырехкилометровой ледяной толщей. Однако, согласно гипотезам, озеро может содержать живые организмы, сохранившиеся с древнейших времен. В пользу этой гипотезы говорят следующие факторы: В озере чистейшая пресная вода, содержащая кислород, поступающий в нее при таянии пограничных слоев льда. Из-за постоянного подледникового таяния к нижней поверхности ледника попадают не только свежая пресная вода, но и пыльца, и другие органические вещества, принесенные на ледник вместе с атмосферными осадками. Недавние исследования показали, что в результате действия приливных сил, поверхность вода-лёд колеблется с амплитудой 1—2 см. Это явление вызывает перемешивание воды и может быть существенным для выживания микроорганизмов. Термические условия в разных частях озера неодинаковы, и это вызывает внутренние течения и активный энергообмен. У дна температура может составлять до 10°C и может быть более, благодаря деятельности подземных геотермальных источников. Несмотря на то, что давление воды, со-

гласно расчетам, более 300 атмосфер, микроорганизмы могут приспособиться к таким условиям.

В пользу возможности существования жизни в озере свидетельствуют результаты ледникового бурения, проводившиеся российскими специалистами и свидетельствующие о наличии микроорганизмов во льду на больших глубинах. В намерзшем льду был обнаружен ряд микробов, но их разнообразие было невелико, и их ДНК оказалось тем же, что и у современных особей (Priscu et al., 1999). Вместе с тем, поскольку бурение льда производилось не для биологических целей, то большую и до конца не решенную проблему представляет его полная биодеконтаминация (Priscu et al., 2005), включая полное удаление следов жидкости для бурения, которая сама по себе представляет среду, пригодную для существования микроорганизмов. Так что остается вероятность, что обнаруживаемые микробы можно объяснить загрязнением вследствие воздействия буровой жидкости и атмосферного воздуха при работе с керном. Биологическое изучение намерзшего льда на молекулярном уровне также дает некоторые основания для предположения об очень малом количестве в нем микробов (Bulat et al., 2001). Между тем, в ледниковом и в намерзшем льду обнаружено несколько вирусов с различной и необычной морфологией, происхождение которых в настоящее время неизвестно и изучается. Существует предположение, что микробы, обнаруженные в намерзшем льду, мигрировали через лед и попали в поверхностные воды озера с талой водой, в то время, когда лед таял, однако быстро замерзли (Siegert et al., 2003). В некоторых биологических исследованиях на глубинах около 3500 был обнаружен бактериальный штамп, ДНК которого подобна ДНК термофильных бактерий (Bulat et al., 2001). Термофильные бактерии, по всей видимости, обитают не в самой воде озера, а в его основании. Было предположено, что они могут жить в относительно теплых (40–60°C на глубине 2–3 км) анаэробных осадочных породах, богатых диоксидом углерода и водородом, в глубоких разломах на дне или окрестностях озера и выбрасываться/выноситься в мелководный залив озера в результате сейсмотектонической активности, периодически происходящей в районе озера Восток (Буллат и др., 2007).

В силу крайне низкой клеточной биомассы, обнаруживаемой во льду озера Восток с ис-

пользованием различных методов, или ее практического отсутствия, делать четких выводов о наличии в озере жизни пока рано. Однако, на сегодняшний день, незадолго до проникновения в озеро, многие ученые имеют большие ожидания, что уже первые пробы воды позволят обнаружить в озере бактерии, возраст которых колеблется в районе 500 тыс. лет. Так как пробы льда, взятые над озером, отличаются очень низким содержанием растворенного углерода (Буллат и др., 2007) для озера должна быть характерна субгляциальная экосистема, характеризующаяся крайне высокой степенью олиготрофности. Окисленные соединения азота (нитраты, нитриты) не выявлены, а восстановленные (аммоний) если и выявляются, то представляют источник загрязнения.

Согласно мнению Талалай (2005), если жизнь в глубинах озера и есть, то образовать экосистему она может только при наличии притока энергии в химической форме (восстановленного неорганического субстрата), достаточных для нефотосинтезирующего синтеза органического вещества, то есть начальными звеньями пищевых цепей экосистемы должны быть хемосинтезирующие организмы. К аналогичным выводам приходят и Булат и др. (2007). Температура всего слоя озерного льда не превышает -7°C , что находится в пределах так называемой физиологической температуры, при которой экспериментально показан факт метаболической активности бактерий (Alekhina et al., 2007). Возможные редокс-пары, которые могут поддерживать хемолитоавтотрофную жизнь, ограничены водородом как единственно возможным восстановителем и, с другой стороны, сульфатами и диоксидом углерода как акцепторами электронов и источником углерода (Буллат и др., 2007). На основе этих представлений, современные предположения о микробной жизни в озере включают следующие положения: в озере возможно обнаружение хемоавтотрофных пьезофильных психрофил. Бактерии в озерном льду должны быть анаэробными, тогда как в воде озера – «оксигенофильными» или аэробными. В обоих случаях микроорганизмы должны быть хемоавтотрофами по способу получения энергии и психрофильными и пьезофильными по физиологии. (Буллат и др. 2007).

Открытие озера Восток расценивается как последнее крупнейшее географическое открытие минувшего века.