

Оптика Байкала

Н.М.Буднев

Для Байкала характерна высокая естественная изменчивость в пространстве и времени многих гидрофизических и гидробиологических процессов. Поэтому для получения минимально представительных, статистически обеспеченных данных, например о численности различных видов фитозоопланктона, необходимо производить отбор проб и полный их анализ не реже, чем один раз в два-три дня в разных местах и на разных глубинах. Такую задачу решить практически невозможно. В этой ситуации большое значение приобретает получение знаний о динамике и взаимном влиянии биогеохимических, гидрофизических, атмосферных и других природных процессов дистанционными физическими методами. Помимо обычных для водоемов оптических и акустических методов долговременного мониторинга, у Байкала есть особый арсенал — эксперименты по исследованию геодинамических и гидродинамических процессов в районе активного разлома в глубоководной части озера ведутся в рамках нейтринного проекта. В развитие изложенного в недавней статье [1] рассмотрим «оптический» аспект использования Байкальского нейтринного телескопа.

Загадочное свечение

Одна из характеристик, которая, вероятно, годится как природная метка для изучения проис-



Николай Михайлович Буднев, доктор физико-математических наук директор Научно-исследовательского института прикладной физики Иркутского государственного университета. Область научных интересов — физика высоких энергий, физика космических лучей, нейтринная астрофизика, науки о Земле.

ходящих в Байкале процессов, причем не только гидрофизических, но и биогеохимических, — свечение водной среды озера. Оно было открыто в ходе создания Байкальского нейтринного телескопа при исследовании фоновых условий на больших глубинах. Первоначальная цель изучения структуры светового поля в воде состояла в том, чтобы определить, до каких глубин озера проникает солнечный свет, где можно размещать оптические детекторы для регистрации черенковского излучения релятивистских заряженных частиц, рождающихся при взаимодействии нейтрино высоких энергий со средой. Оказалось, что на глубинах больше 500 м плотность потока фотонов от Солнца в Байкале становится меньше, чем 100 фотонов/(см²с). Однако полной темноты мы не нашли нигде: выяснилось, что на всех глубинах существует дополнительный свет [2], источники которого находятся в толще байкальской воды. Это свечение водной среды

уменьшается с глубиной, но медленнее, чем солнечное излучение, так что его вклад в световое поле озера становится главным с глубин порядка 400—450 м днем и 100—120 м в безлунные ночи. Плотность потока фотонов E_p на глубине 1000 м, как правило, составляет несколько сотен фотонов на квадратный сантиметр в секунду, что по порядку величины близко к вкладу в E_p в океане от свечения продуктов распадов K^{40} (рис.1).

Хотя теперь понятно, что факт свечения водной среды в Байкале на таком уровне совершенно естествен, его обнаружение было неожиданным. Дело в том, что, в отличие от соленых морских и океанских вод, где в изобилии обитают светящиеся рыбы, ракообразные, бактерии и т.д. [3], в пресных водоемах способные к биolumинесценции организмы до сих пор не найдены. А радиоактивных элементов, продукты распада которых могли бы излучать черенковский свет, в байкальской воде очень мало.

© Буднев Н.М., 2012

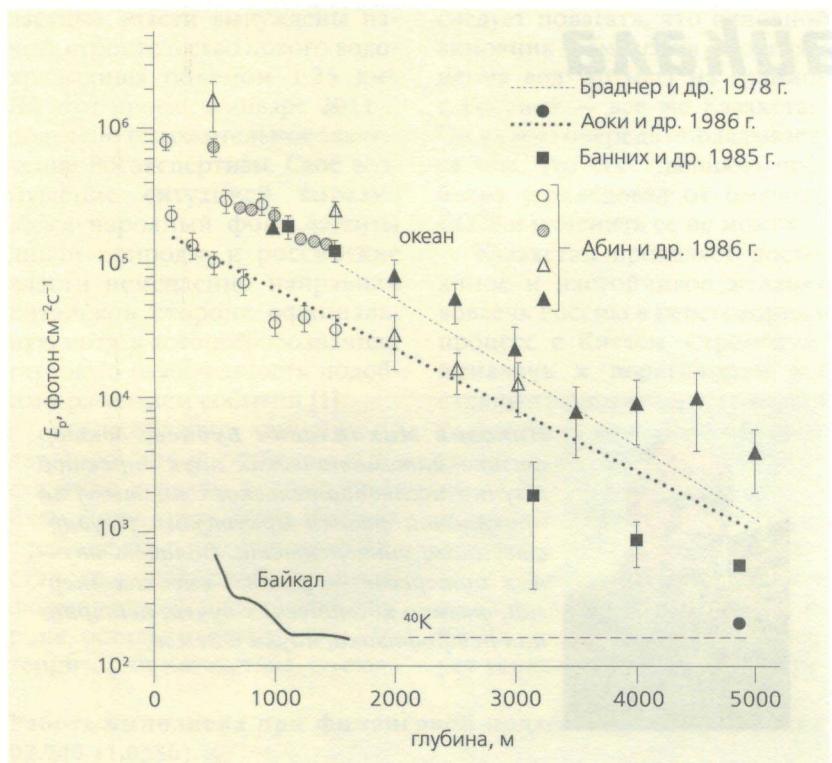


Рис.1 Зависимость плотности потока фотонов E_p в оз.Байкал от глубины в сравнении с этой величиной в океане.

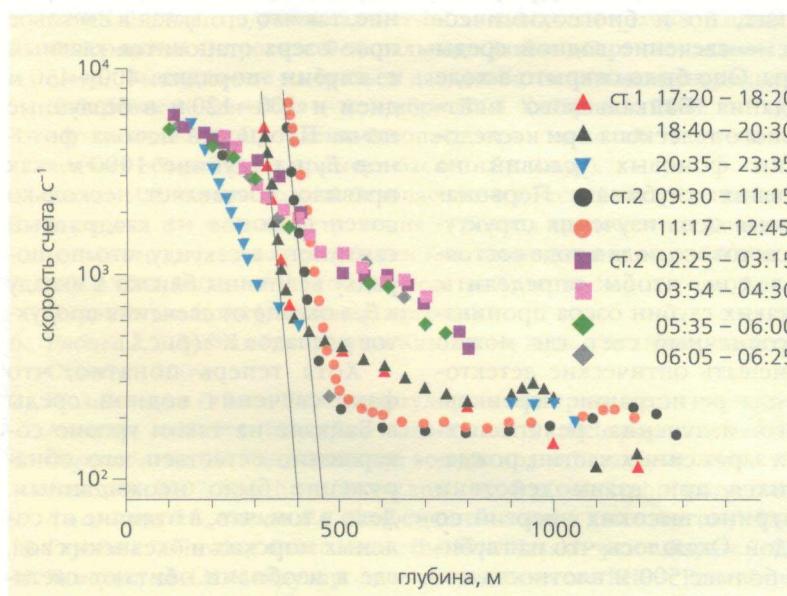


Рис.2. Зависимость скорости счета однофотоэлектронных импульсов ФЭУ I_p от глубины погружений для трех станций в южном Байкале: 1 — середина разреза Маритуй—Солзан, 4 августа 1983 г.; 2 — середина разреза Листвянка—Танхой, 5 августа 1983 г.; 3 — три мили от мыса Красный Яр, 7 августа 1983 г. Сплошные линии — вклад солнечного света. Статистические ошибки измерений меньше размеров символов. Плотность потока фотонов может быть вычислена из этих данных по формуле E_p (фотон/ $\text{см}^2\cdot\text{с}$) = $(3.5 \pm 1.0)I_p$.

Первые целенаправленные исследования свечения были выполнены с помощью специально разработанного батифотометра — прибора на основе фотоэлектронного умножителя ФЭУ-130, работающего в режиме счета фотонов и снабженного управляемым шторным затвором и кассетой сменных светофильтров [4]. Управляемый электромагнитом затвор позволяет надежно выделить свечение внешней среды на фоне темнового тока ФЭУ, свечения иллюминатора и светофильтров, благодаря чему удается измерять сверхслабые световые потоки на уровне чувствительности порядка 1 фотон/($\text{см}^2\cdot\text{с}$) и проводить абсолютную калибровку прибора. Уже первые измерения с помощью этого батифотометра выявили достаточно сложную картину пространственно-временной зависимости глубинного хода светового поля на озере Байкал.

На рис.2 для примера представлена глубинная зависимость скорости счета импульсов ФЭУ I_p по данным измерений, выполненных в первой декаде августа 1983 г. с борта научно-исследовательского судна «Г.Ю.Верещагин» на двух дрейфовых и одной якорной стоянках в Южном Байкале. Из рисунка видно, что в некоторых интервалах глубин свечение уменьшается с глубиной почти по экспоненциальному закону, однако есть области, где ход кривой выполняется, показатель экспоненты меняется и даже могут наблюдаться локальные максимумы. Важно отметить, что в таких областях часто наблюдаются существенные вариации свечения за время в несколько часов. Еще ярче последнее обстоятельство прослеживается в результатах измерений, проведенных со льда в районе размещения НТ200 (рис.3). В диапазоне глубин H от 300 до 900 м данные о свечении хорошо аппроксимируются экспонентой $I_p(H) = I_p(0)\exp(-H/H_0)$, $H_0 = 320$ м, а на глубинах 1000—

1200 м, как правило, уровень свечения существенно варьирует, при том что по данным о температуре [1] это самая стабильная область.

Источник обнаружен!

Из первоначальной узкоспециальной задачи определения фоновых условий для работы оптических черенковских детекторов исследование свечения и возможностей использования этого явления для тех или иных практических целей переросло в самостоятельную задачу. Как показали дальнейшие работы [5], свечение байкальской воды в основном определяется хемилюминесценцией, возникающей при окислении активных органических радикалов, которые содержатся в неживой мелкой органической взвеси (характерный размер светящейся взвеси ~1 мкм), а также находящихся в растворенном состоянии органических веществ. Были установлены и многие другие свойства свечения байкальской воды, в частности: оно носит преимущественно однофотонный, не вспышечный характер; не стимулируется умеренным механическим возмущением воды; не зависит от давления; пропорционально содержанию кислорода. При разбавлении байкальской воды дистиллятом свечение уменьшается пропорционально степени разбавления. Для выделенной порции водной среды оно затухает по экспоненциальному закону с постоянной времени 10–30 сут.

С учетом этих и других свойств свечения было высказано предположение [5], что способные светиться вещества производятся главным образом в верхнем слое озера, где есть солнечный свет и наиболее активны гидробиологические процессы синтеза. Отмерший фито-зоопланктон постепенно переносится по всей водной толще водными потоками за счет турбулентных процессов и оседа-

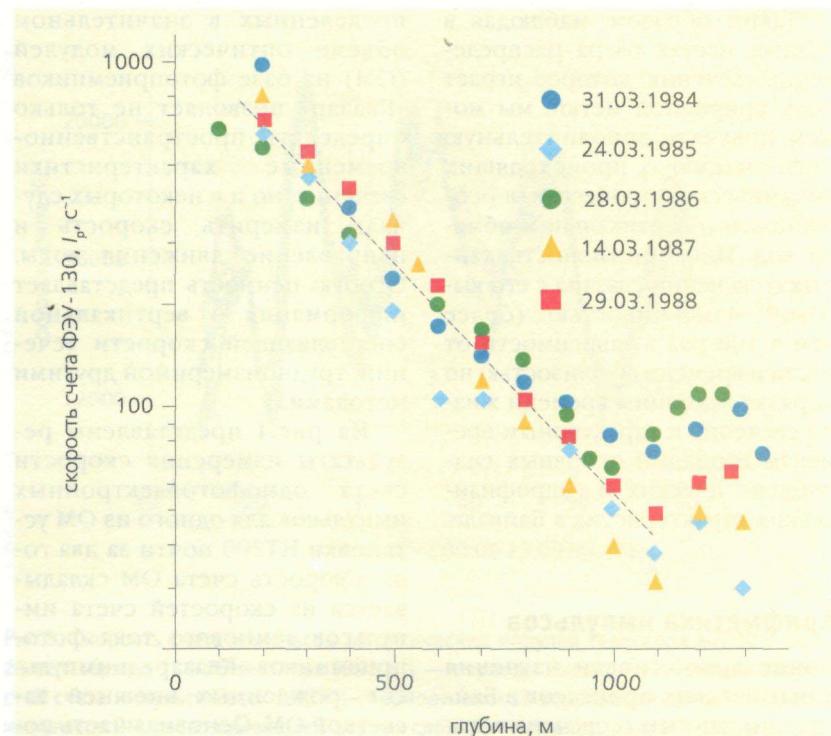


Рис.3. Результаты измерений светового поля в районе развертывания НТ200. Прямая линия — результат аппроксимации данных $I_p(H) = I_p(0)\exp(-H/H_0)$, $H_0 = 320$ м.

ния, утрачивая со временем способность светиться. Если источники света генерируются в приповерхностном слое озера с постоянной скоростью и переносятся вглубь с постоянной эффективной скоростью $v_{\text{эфф}}$, теряя способность светиться с постоянной времени τ , должно наблюдаться экспоненциальное уменьшение свечения с глубиной $E_p(H) = E_p(0) \exp(-H/H_0)$, где величина $H_0 = v_{\text{эфф}}\tau$. Параметр τ — величину «времени жизни» — измерить труднее всего. Если взять $\tau = 20$ сут, наиболее характерное в зимнее время значение $H_0 = 320$ м получится при скорости вертикального переноса $v = 0.2$ мм/с, что выглядит достаточно разумной по порядку величины оценкой.

В рассматриваемой модели наблюдаемые экстремумы свечения могут объясняться дополнительным притоком в данное место источников свечения с большей концентрацией или с «возрастом» меньшим, чем

H_0/v , а провалы в интенсивности свечения должны быть связаны с подъемом более «старых» вод. В любом случае отклонение глубинной зависимости свечения от экспоненциальной означает нарушение условия пространственной или временной однородности в процессах обмена вод или генерации источников свечения. Если такая интерпретация справедлива, то даже в августе и сентябре, когда на Байкале имеется относительно устойчивая вертикальная стратификация воды, в разных местах озера на различных глубинах наблюдается результат действия неоднородных процессов. Это происходит, например, на глубинах 900–1000 м у станции 1 (рис.2) и на глубинах 600–700 м у станции 3, а напротив истока Ангары у станции 2 свечение вообще почти постоянно в диапазоне глубин от 500 до 1300 м, что свидетельствует об интенсивном апвеллинге в этом районе.

Таким образом, наблюдая в разных местах озера распределение свечения, которое играет роль природной метки, мы можем получать дополнительную информацию о происходящих динамических процессах, в особенности о вертикальном обмене вод. Информативность данных о свечении связана с его высокой изменчивостью (более чем в 100 раз в зависимости от места и времени) и близостью по порядку величины времени жизни свечения к характерным временам вариаций основных гидробиологических и гидрофизических характеристик в Байкале.

Арифметика импульсов

Новые возможности изучения динамических процессов в Байкале по данным о свечении появились с началом эксплуатации нейтринного телескопа НТ200 [6]. Анализ данных установки о скоростях счета рас-

пределенных в значительном объеме оптических модулей (ОМ) на базе фотоприемников «Квазар» позволяет не только определять пространственно-временные характеристики свечения, но и в некоторых случаях измерять скорость и направление движения воды. Особую ценность представляет информация о вертикальной составляющей скорости течений, трудноизмеримой другими методами.

На рис.4 представлены результаты измерения скорости счета однофотоэлектронных импульсов для одного из ОМ установки НТ200 почти за два года. Скорость счета ОМ складывается из скоростей счета импульсов темнового тока фотоприемников «Квазар» и импульсов, рожденных внешней за светкой ОМ. Основная часть последних вызвана свечением водной среды озера. На рис.4 хорошо видны как периоды относительной стабильности, так

и области быстрых изменений измеряемой величины. Скорость счета импульсов темновых токов фотоприемников «Квазар» достаточно стабильна в условиях работы на Байкале и, как правило, составляет для разных приборов 20–40 кГц. Поэтому наблюдаемые вариации скоростей счета ОМ установленки НТ200 связаны с изменениями интенсивности свечения водной среды. На фоне общего возрастания интенсивности свечения в осенний период видны многосуюточные ее вариации. Максимальный уровень свечения и наибольшие его вариации фиксируются обычно в августе–сентябре и/или в декабре–январе. Например, в сентябре 1993 г. не только в несколько раз повысился средний уровень скоростей счета импульсов ОМ, но и наблюдались двухкратные вариации свечения за довольно короткое время (порядка 10 ч) и высокая его неоднородность на расстояниях в несколько де-



Рис.4. Скорость счета импульсов одного из ОМ телескопа НТ200, за 1993—1995 гг. Квадраты — численность бактерий в поверхностных водах у пос. Большие Коты.

сятков метров (рис.5). В некоторых случаях (периоды 1, 3 на рис.5) регистрировались одинаковые по форме, но сдвинутые во времени изменения скоростей счета импульсов всех ОМ. Сдвиг во времени в основном происходил только для ОМ, находящихся на одном горизонте, а для разнесенных по вертикали не был заметен. Это можно интерпретировать как перемещение в горизонтальном направлении неоднородности с размерами много большими, чем размер телескопа (который составляет несколько десятков метров в зависимости от места сечения). Иногда форма временной зависимости и величина скоростей счета импульсов ОМ, разнесенных по вертикали и/или горизонтали, существенно различаются (периоды 2 на рис.5). Здесь можно говорить о горизонтальном движении неоднородностей с характерными поперечными размерами пространственной структуры, меньшими размеров телескопа.

Корреляционный анализ временной зависимости скоростей счета импульсов ОМ, расположенных в пространстве, позволил в некоторых случаях определить скорость и направление движения воды. На рис.6 в укрупненном масштабе представлены скорости счета импульсов некоторых ОМ за период 3; хорошо виден сдвиг во временной зависимости скоростей счета импульсов ОМ, находящихся на одной вертикали. В то же время временной сдвиг для ОМ, расположенных на одном горизонте, отсутствует. Результаты корреляционного анализа соответствуют вертикальному перемещению светящегося фронта со скоростью $V_{vert} = 2.3$ см/с. Важно отметить, что осенний рост биомассы в верхних слоях не привел бы к одновременному увеличению интенсивности свечения на больших глубинах без участия в перераспределении веществ в озере водообменных процессов, поскольку скорость седи-

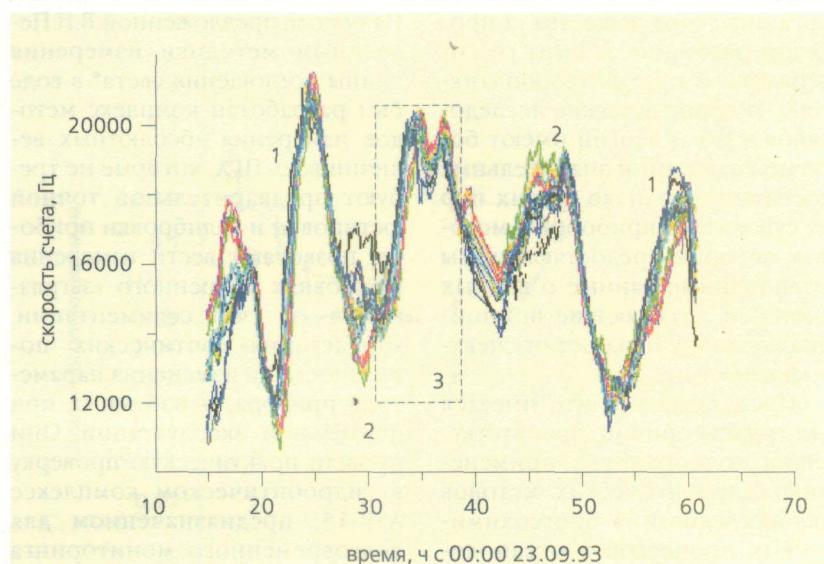


Рис.5. Скорость счета импульсов 19 оптических модулей телескопа HT200 с 14 ч 23 сентября до 13 ч 25 сентября 1993 г. 1 — периоды высокой корреляции скоростей счета импульсов всех ОМ; 2 — периоды плохой корреляции скоростей счета импульсов ОМ, расположенных в разных слоях; 3 — период, показанный на рис.6.

ментации частиц микрометрового размера (определяющих свечение) не превышает 10^{-4} см/с. Неоднородность интенсивности свечения, ее временной ход служат указанием на определяющую роль динамических факторов, действующих на поверхность озера в процессах вертикального обмена вод во всем диапазоне глубин (по крайней мере первое существенное повышение скоростей счета импульсов всех ОМ нейтринного телескопа произошло через несколько дней после сильного шторма в начале августа, а не в период весенней гомотермии).

Гидрооптика — биогеохимии

Потенциал гидрооптики как метода наблюдения за многими процессами в больших водоемах (океанах, морях, крупных озерах) связан с тем, что спектральные характеристики поглощения света в чистых природных водах определяются в основном качественным составом и количеством растворенного

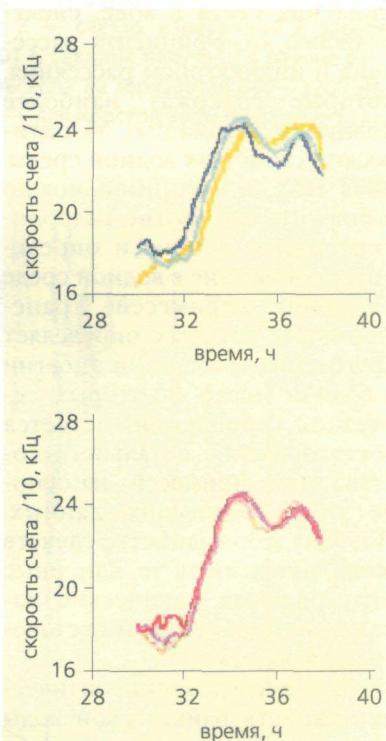


Рис.6. Скорость счета импульсов для некоторых ОМ установки HT200 в период 3 (рис.5). Вверху — для ОМ, расположенных на одной вертикали, внизу — для ОМ, расположенных на одном горизонте.

органического вещества, а процессы рассеяния зависят от содержания в воде фитозоопланктона. Гидрооптические исследования в океанологии имеют богатые традиции и значительные достижения, однако до сих пор не существует приборов и методов, которые предоставили бы полноценные данные о водных системах, отвечающие принципиальным возможностям спектрофотометрии.

Представляется, что имеется две группы причин, препятствующих полноценному применению гидрооптических методов для исследования биогеохимических процессов в океанологии и лимнологии. Во-первых, весьма сложно создать приборы, которые позволяли бы осуществлять долговременный мониторинг абсолютных значений первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) — спектрального коэффициента поглощения света в воде, спектрального коэффициента рассеяния и индикаторы рассеяния, которые содержат наиболее полную информацию об оптических свойствах водной среды. Зная ПГХ, в принципе можно вычислить все другие гидрооптические величины и определить содержание в водной среде различных « примесей », трансформация которых определяет круговорот вещества и энергии в водной толще. Во-вторых, серьезной проблемой остается восстановление детального состава этих « примесей » на основе гидрооптических данных. Поэтому в большинстве случаев измеряются лишь те или иные интегральные оптические характеристики среды и светового поля водоемов.

При исследовании оптических свойств байкальской воды как рабочего тела черенковских детекторов с самого начала была поставлена задача разработки способов измерения абсолютных величин ПГХ *in situ*, причем допускающих долговременные наблюдения прибором на стационарной буйковой станции.

На основе предложенной В.Н.Пелевиным методики измерения длины поглощения света* в воде был разработан комплекс методов измерения абсолютных величин всех ПГХ, которые не требуют предварительной точной юстировки и калибровки прибора, позволяют вести измерения в условиях умеренного «загрязнения» за счет седimentации, «обрастания» оптических поверхностей и изменения параметров прибора, неизбежных при длительной эксплуатации. Они прошли практическую проверку в гидрооптическом комплексе ASP-15, предназначенному для долговременного мониторинга ПГХ, который уже 15 лет работает на одной из буйковых станций глубоководного комплекса Байкальского нейтринного телескопа [7]. ASP-15 имеет два приемника: один с широкой апертурой — для измерения длин рассеяния и поглощения света, другой с узкой апертурой — для измерения индикаторы рассеяния. Для выделения света с определенной длиной волны световой поток проходит через интерференционные светофильтры, которые меняются с помощью ленточного транспортера. Белые источники света перемещаются с помощью шагового двигателя в пределах 1—15 м от корпуса с приемниками, что позволяет совмещать процесс измерений ПГХ с калибровкой прибора *in situ*. В 2009 г. завершено создание экспериментального образца гидрооптического прибора нового поколения Baikal-4D, который построен на основе современной элементной базы и имеет ряд принципиальных достоинств, в частности, его источник света сделан на базе дифракционной решетки, что позволяет более чем на порядок повысить спектральное разрешение прибора.

* Длина поглощения света $l_a(\lambda)$ — расстояние в среде, на котором число движущихся параллельно фотонов уменьшается в e раз в предположении, что фотоны только поглощаются, но не рассеиваются.

На рис. 7 приведены примеры спектров поглощения света (зависимости обратной к длине поглощения величины $a = 1/l_a$ от длины волны света) для оз. Байкал в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа в сравнении с некоторыми опубликованными спектрами поглощения для наиболее чистой глубинной морской и дистиллированной воды. Из рисунка видно, что в красной области спектра все кривые близки (некоторый разброс обусловлен ошибками измерений). Это означает, что длина поглощения в чистых байкальских и морских водах определяется поглощением собственно водой, т.е. практически не зависит от содержащихся в воде примесей. В синей области спектра длина поглощения света в байкальской воде существенно меньше не только по сравнению с дистиллированной, но и с глубинной морской. Это связано с тем, что поглощение в этой части спектра сильно зависит от количественного и качественного состава содержащихся в воде растворенных органических веществ, концентрация которых в Байкале выше, чем в чистых морских водах.

Суммарно растворенную органику, поглощающую свет в сине-зеленой области спектра, в океанологии и лимнологии называют «желтым веществом». Минимум поглощения в байкальской воде лежит в области сине-зеленого света с длиной волны 460—500 нм, и свет в этом «окне прозрачности» достигает наибольших глубин — примерно 400—500 м. Как правило, длина поглощения света для «окна прозрачности» байкальской воды составляет 20—24 м* и не слишком сильно меняется с глубиной.

* На этом расстоянии интенсивность света за счет поглощения уменьшается в e раз, но поток фотонов на поверхности очень велик, так что, уменьшаясь — с учетом рассеяния — в e раз на каждых 17 (!) м, он все же доходит до глубины 400—500 м.

биной, временем года и местом, исключая районы впадения рек, что говорит об относительной однородности распределения растворенных органических веществ в озере. Максимальный вертикальный градиент поглощения обычно наблюдается на глубинах 0–300 м, увеличение длины поглощения с глубиной, как правило, не превышает 20–30%, достигая в отдельные годы 100% из-за более высокого содержания органики в поверхностных водах; на глубинах 500–1000 м вертикальный градиент практически отсутствует. Однако по данным многолетнего мониторинга ПГХ, на глубине 1000 м в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа периодически происходят случаи увеличения длины поглощения до 40–50 м, что должно быть следствием значительного уменьшения концентрации растворенной органики. Количественно соответствующее изменение концентрации растворенных веществ можно оценить следующим образом. Длина поглощения света в «чистой воде» на длине волны 488 нм, согласно последним данным [8], составляет 69.5 м, среднее значение длины поглощения света в Байкале на глубине 100 м — 22.7 м. Для того чтобы длина поглощения в этой воде стала равной 50 м, концентрация органики должна уменьшиться более чем в пять раз!

Показанные на рис.7 минимальные значения поглощения в 1992 и 2001 гг. наблюдались также в 1997, 2004 и 2008 гг. (рис.8). Такое значительное «просветление» глубинной байкальской воды (уменьшение концентрации растворенных органических веществ) особенно удивительно, потому что обычно нигде в Байкале воды с таким низким поглощением не наблюдаются и должен существовать специальный механизм «очистки» воды от органики. На сегодняшний день такой механизм неизвестен, не видно и однозначной корреляции слу-

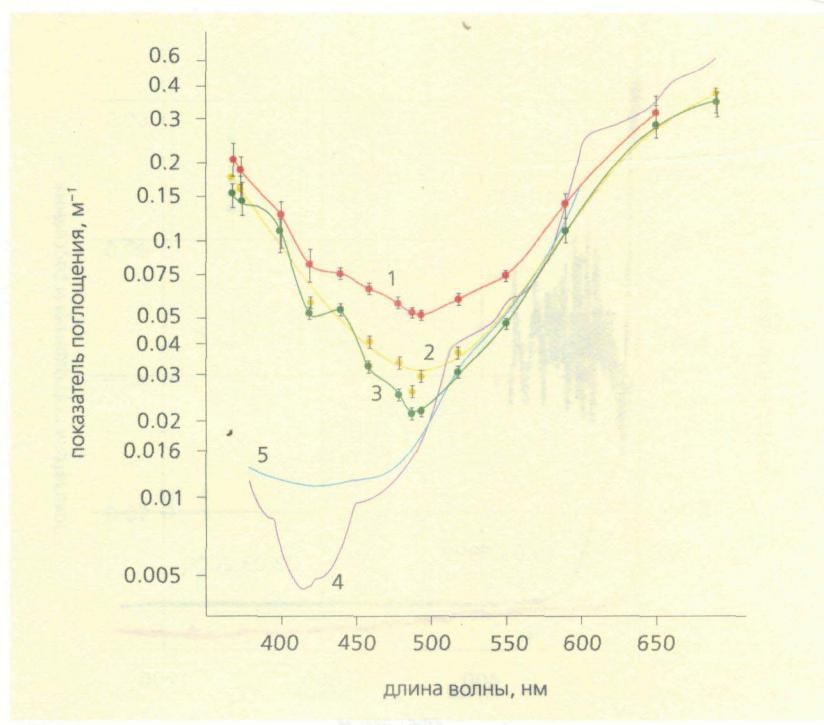


Рис.7. Спектры поглощения света байкальской водой в сравнении со спектрами поглощения для наиболее прозрачных вод. 1 — усредненный спектр по данным измерений за период с 1987 по 2007 г.; 2 — спектр, измеренный 8 апреля 2001 г.; 3 — спектр, измеренный 4 мая 2001 г. (данные получены в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа на горизонтах 800—1200 м); 4 — для очищенной воды по данным [8]; 5 — для морской воды по данным [12].

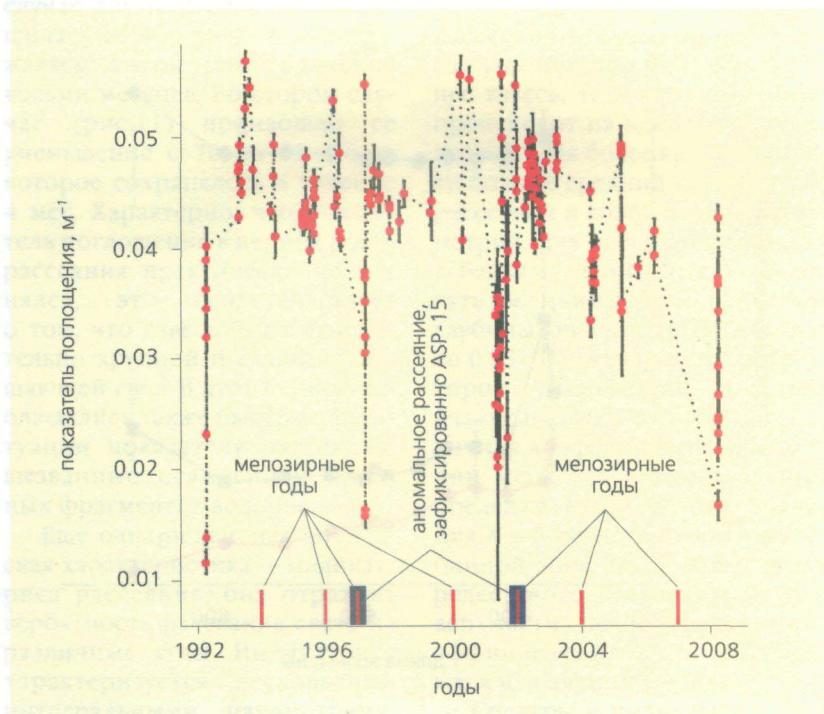


Рис.8. Зависимость от времени показателя поглощения света с длиной волны 488 нм в глубинных водах в окрестности Байкальского нейтринного телескопа.

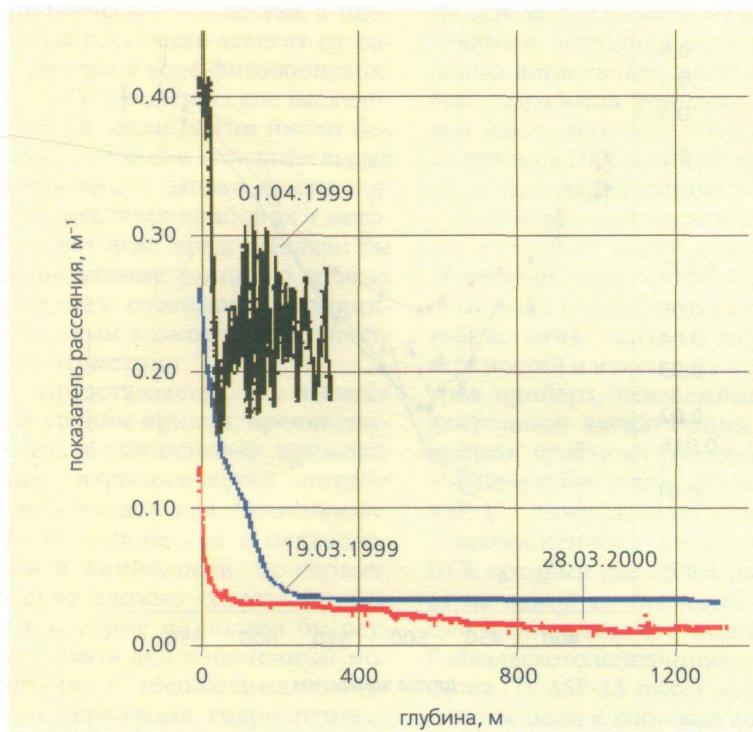


Рис.9. Глубинная зависимость показателя рассеяния для света с длиной волны 480 нм весной 1999 и 2000 гг.

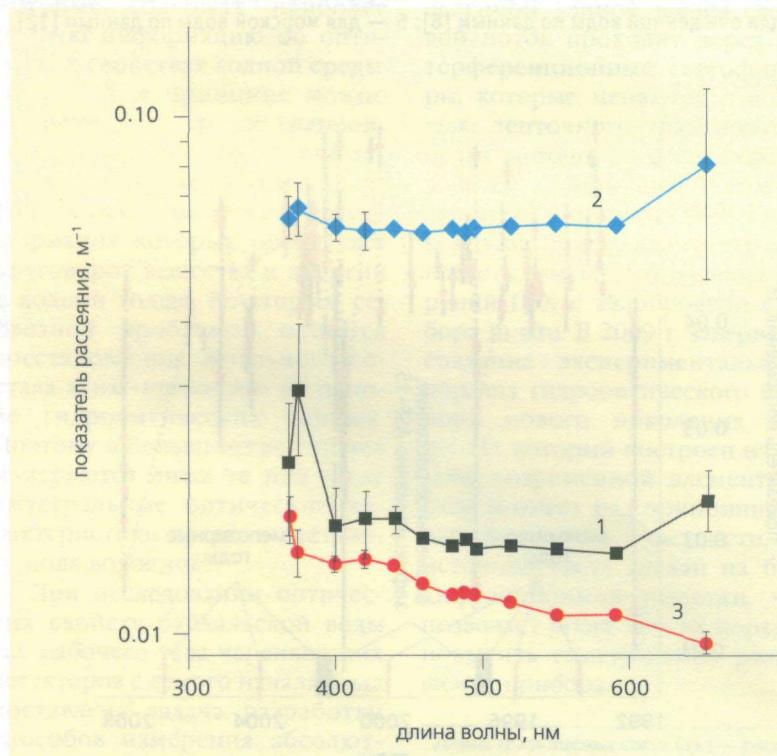


Рис.10. Спектральная зависимость показателя рассеяния на глубине 800 м в апреле 2001 г. Кривая 1 — измерение 4 апреля, кривые 2 и 3 — 6 и 8 апреля 2001 г. соответственно.

чаев уменьшения поглощения с вспышками численности водорослей *Aulacoseira baicalensis*, происходящими в так называемые мелозирные годы.

Капризы взвеси

Рассеяние света в природных водах определяется в основном количественным и качественным составом взвеси (под взвесью подразумеваются частицы размером не более нескольких десятков микрометров). В чистых озерных, морских и океанских водах подавляющую часть взвеси составляют частицы органического происхождения: бактерии, фито- и зоопланктон, продукты жизнедеятельности биоты. Плотность таких частиц взвеси близка к плотности воды, поэтому они очень медленно тонут в воде, их движение подобно броуновскому движению пыли в воздухе. Неорганические частицы имеют больший удельный вес и тонут быстрее; в крупных водоемах в заметном количестве они могут присутствовать только вблизи берегов, особенно возле мест впадения рек.

В отличие от концентрации растворенной (до молекул) органики, количество органической взвеси в Байкале очень сильно зависит от глубины, места и времени — за счет высокой неравномерности распределения по объему озера и изменчивости продуктивности различных видов фито- и зоопланктона во времени. Естественно, это приводит к высокой изменчивости и неоднородности рассеяния света в байкальской воде (рис.9, 10). Таким образом, длина рассеяния* света служит объ-

* Длина рассеяния света $I_b(\lambda)$ — расстояние в среде, на котором число движущихся параллельно фотонов уменьшается в e раз исключительно за счет рассеяния. Различить экспериментально длины поглощения и рассеяния — непростая задача, но в байкальском проекте она была успешно решена.

ективным физическим индикатором активности биологических процессов в озере. Из рис.9 видно, что показатель рассеяния света очень сильно меняется с глубиной и временем. В начале марта на первых десятках метров длина рассеяния быстро растет с глубиной (максимально — в 10 раз в интервале глубин 0–50 м), далее ее глубинная зависимость ослабевает, в диапазоне глубин 50–1300 м длина рассеяния растет только в два раза. Это отражает тот факт, что наиболее биопродуктивен верхний слой озера, где много солнечного света, а термоклин играет роль «жидкого дна», удерживающего основную часть органической взвеси на малых глубинах. Велико также различие не только между рассеянием в верхней зоне в разные годы, например, в 2000 г. и 1999-м, но иногда и между результатами измерений, выполненных с интервалом в несколько дней. Например, в 1999 г. с 19 марта по 1 апреля значительно активизировались процессы свободной конвекции, что привело к существенному увеличению рассеяния вследствие роста концентрации взвеси на глубинах до 300 м; более того, глубинная зависимость стала отличаться высокой неоднородностью и изменчивостью. В апреле 2001 г. на глубине 800 м (рис.10) длина рассеяния менялась в течение пяти дней в интервале 15–80 м, причем немонотонно (заметим, что типичное значение длины рассеяния на больших глубинах в Байкале составляет 30–100 м). Спектр рассеяния (зависимость обратной к длине рассеяния величины $b = 1/l$, от длины волны света) аппроксимируется функцией, близкой к λ^{-1} , но иногда на спектре проявляются заметные локальные экстремумы и рост рассеяния в красной области.

Дважды, в 1997 и 2002 гг., на ми наблюдалось длительное увеличение показателя рассеяния на глубине 1000 м. Это совпадало по времени со вспышка-

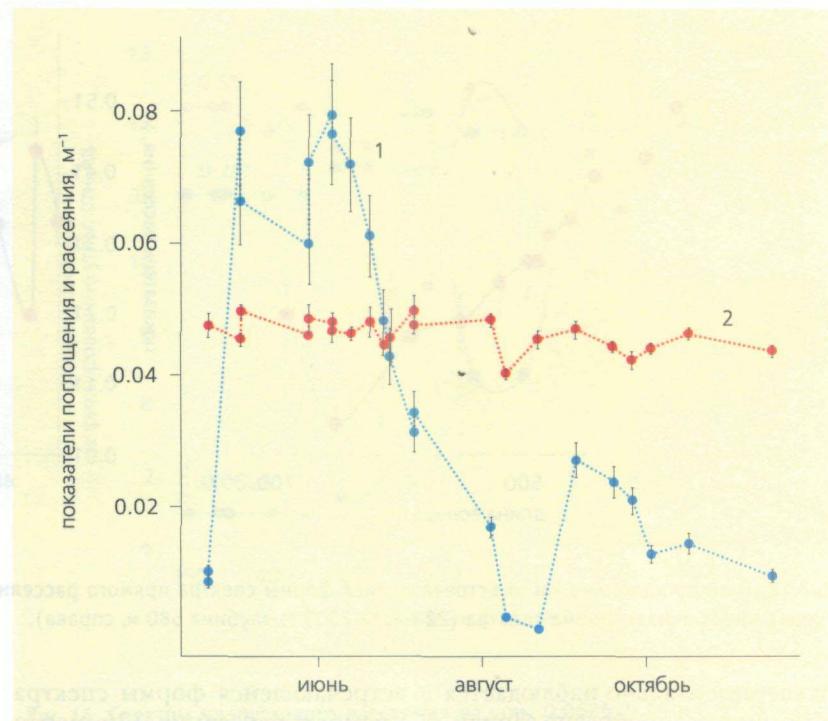


Рис.11. Зависимость от времени в течение 2002 г. показателей рассеяния (1) и поглощения (2) света с длиной волны 488 нм в глубинных водах в окрестности Байкальского нейтринного телескопа.

ми размножения водоросли *Aulacoseira baicalensis*. В первом случае длина рассеяния уменьшилась со 100 до 4–6 м и держалась на этом уровне в течение восьми месяцев. Во втором случае (рис.11) произошло ее уменьшение с 70 до 12–16 м, которое сохранялось в течение 4 мес. Характерно, что показатель поглощения в период роста рассеяния практически не менялся, это свидетельствует о том, что взвесь была относительно крупной и слабо поглощающей свет. В этот период наблюдались также быстрые флуктуации показателя рассеяния, вызванные осаждением крупных фрагментов водорослей.

Еще одна первичная оптическая характеристика — индикатриса рассеяния, она отражает вероятность рассеяния света на различные углы. Индикатриса характеризуется несколькими интегральными параметрами, такими как средний косинус угла рассеяния $\langle \cos\theta \rangle$ и коэффициент асимметрии $K = b/b_{back}$ —

отношение вероятности рассеяния в переднюю полусферу (на угол меньше 90°), к вероятности рассеяния в заднюю полусферу (на угол больше 90°). Чем крупнее взвесь, тем чаще рассеяние происходит на небольшие углы, поэтому для более крупной взвеси большие средний косинус угла рассеяния и коэффициент асимметрии. Для поверхностных вод в Байкале $\langle \cos\theta \rangle$ может достигать величины 0.95; с ростом глубины он снижается, обычно до 0.85–0.9, что говорит о некотором уменьшении среднего размера взвеси с глубиной. Величина коэффициента асимметрии меняется в значительных пределах. Минимальные значения $K = 5$ регистрируются в глубинной зоне, здесь велик вклад релеевского рассеяния; на поверхности среднее значение коэффициента $K = 60$, но наблюдаются и значения $K = 500$.

Спектры и индикатриса рассеяния несут наиболее полную информацию о составе фито- и зоопланктона в водной среде.

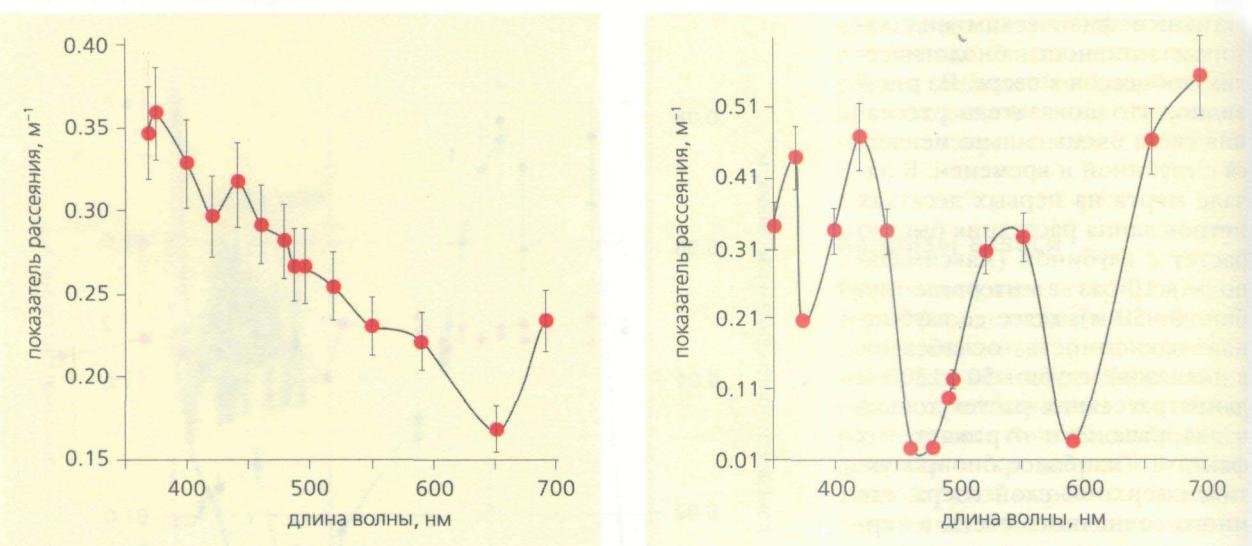


Рис.12. Пример наиболее часто встречающейся формы спектра прямого рассеяния света (26 марта 2006 г., глубина 1 м, слева), «необычная» форма спектра (22 марта 2006 г., глубина 580 м, справа).

Экспериментально наблюдается огромное разнообразие вариантов спектров рассеяния, особенно на малых глубинах. В принципе на основе анализа этих спектров можно определять количественный и качественный состав биоты в воде гораздо более простым, быстрым и дешевым способом, чем с помощью традиционных методов анализа проб. Здесь мы проиллюстрируем только некоторые наблюдательные данные. На рис.12 слева показан пример наиболее часто

встречающейся формы спектра прямого рассеяния (26 марта 2006 г., глубина 1 м), справа — «необычная» форма (22 марта 2006 г., глубина 580 м). Чаще всего спектральная зависимость прямого рассеяния (на угол меньше 90°) близка к $1/\lambda$. На этом построен метод определения среднего размера и концентрации частиц дисперсной фазы по измеренному спектру рассеяния. В основе метода лежит измерение спектральной зависимости интегрального рассея-

ния, которая в диапазоне порядка 200 нм аппроксимируется обратной степенной зависимостью от длины волны [9]. Такая зависимость наблюдается не всегда; спектр, приведенный на рис.12 справа, существенно немонотонный, а отношение между минимальными и максимальными значениями показателя прямого рассеяния достигает 50. Факт немонотонности спектра является указанием на возможную интерференционную природу процессов рассеяния света

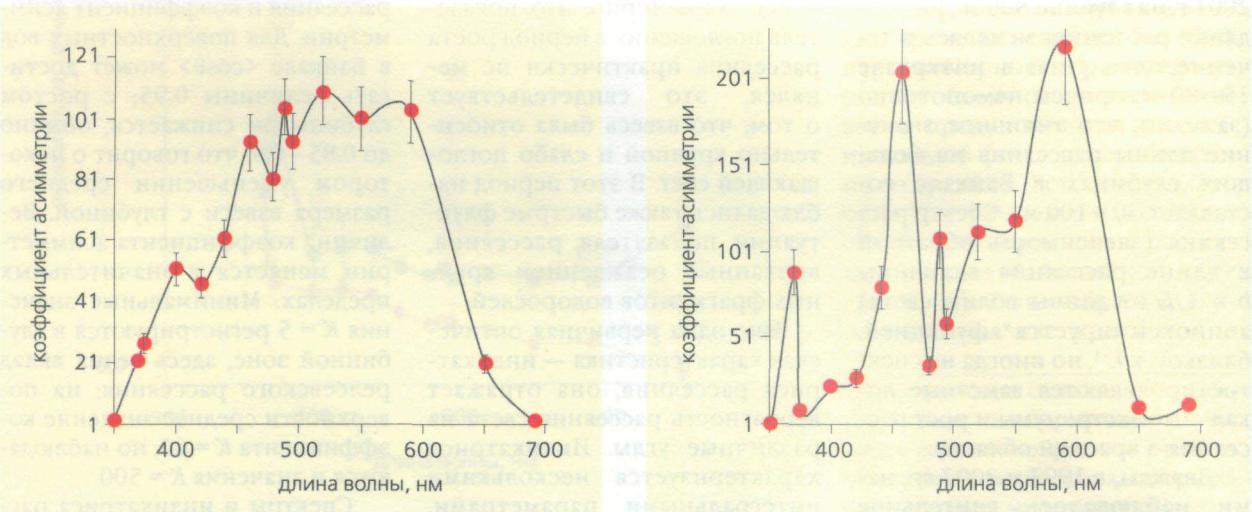


Рис.13. «Обычная» форма спектра коэффициента асимметрии (4 апреля 2006 г., глубина 20 м, слева), «необычная» форма спектра (26 марта 2006 г., глубина 1 м, справа).

в области малых углов. Это не противоречит теоретическому представлению, что при рассеянии на углы, близкие к нулю, отдельные рассеиватели когерентны [10].

Еще большая немонотонность обнаруживается в спектрах коэффициентов асимметрии и обратного рассеяния. На рис.13 слева показана «обычная» форма спектра коэффициента асимметрии (4 апреля 2006 г., глубина 20 м), справа — «необычная» (26 марта 2006 г., глубина 1 м), в последнем случае величина коэффициента асимметрии меняется в 200 раз. Чтобы детализировать процесс прямого рассеяния и причину немонотонности спектров, мы измерили спектральный состав света, рассеиваемого на определенные углы. На рис.14 приведены спектры рассеяния на углы 0.0625, 0.25 и 0.5°. Наибольшего внимания заслуживает тот факт, что спектр рассеяния на угол 0.5° оказывается «дополнением» к спектру рассеяния на 0.0625°, в сумме они дают почти константу, по величине близкую к гладкому спектру, соответствующему среднему углу 0.25°. Эффект «дополнительного» спектра — известное явление в поглощающих прозрачных пленках [11]. Возможно, в данном случае наблюдается подобное явление.

На рис.15 приведены три спектра рассеяния света в переднюю полусферу, измеренные на глубине 100 м в районе расположения НТ200 с помощью нового гидрооптического прибора Baikal-4D, который позволяет измерять спектры рассеяния с разрешением не хуже 0.2 нм. Спектры измерялись с интервалом примерно 30 мин., начиная с 0 ч 30 мин 06 апреля 2011 г., в них отчетливо наблюдаются локальные экстремумы, положение которых меняется во времени, что свидетельствует об изменении состава воды в просматриваемом прибором объеме.

В ближайшее время мы планируем выполнить совместные измерения оптических свойств

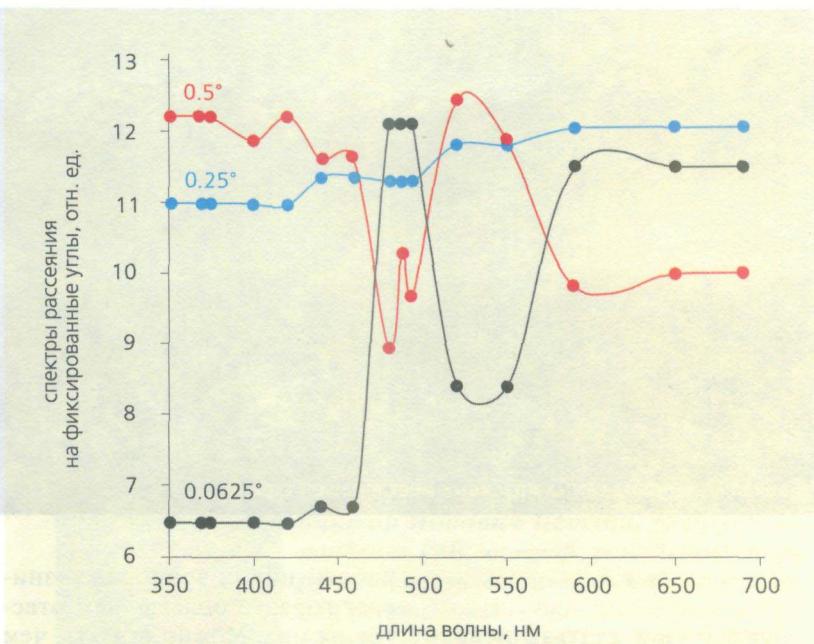


Рис.14. Спектры малоуглового рассеяния на углы 0.0625, 0.25 и 0.5°, измеренные на расстоянии 1 м от льда 26 марта 2009 г. в районе Байкальского нейтринного телескопа.

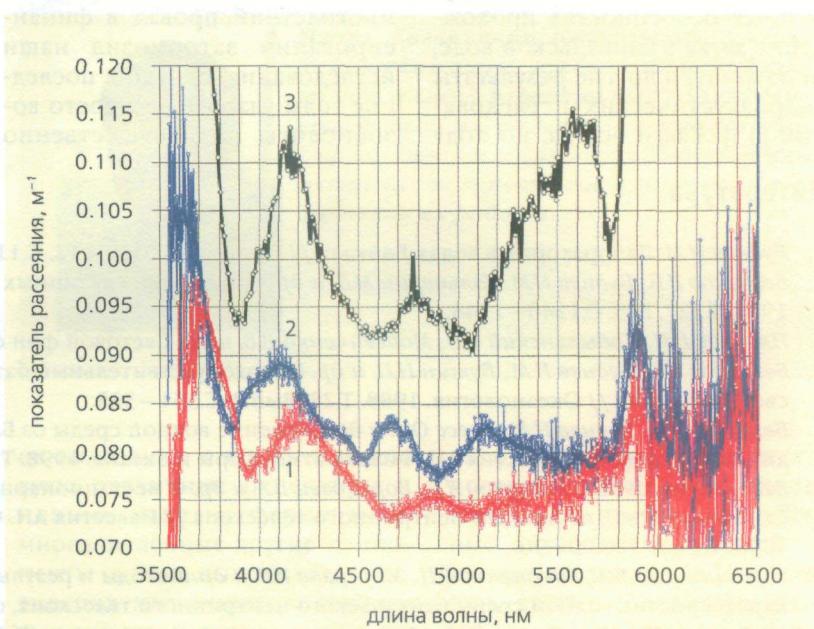


Рис.15. Сплошные спектры «прямого» рассеяния на глубине 100 м, измеренные 6 апреля 2011 г. с помощью прибора BAIKAL-4D.

байкальской воды с одновременным отбором проб для комплексного их анализа. В результате мы рассчитываем разработать методику использования

гидрооптических данных в качестве «маркера» для идентификации вод и мониторинга биогеохимических процессов в Байкале.



Байкал — одно из самых красивых мест в нашей стране.

* * *

Даже в двух статьях невозможно рассказать исчерпывающим образом о всех результатах, уже полученных в рамках Байкальского нейтринного проекта. Например, мы ничего не сказали о недавно обнаруженных особенностях прохождения звука в байкальской воде, не затронули другие результаты гидроакустических исследований [13]. Как и всегда, по ходу

работы новых вопросов возникает гораздо больше, чем ответов на них. Можно сказать, чем больше мы знаем о Байкале, тем больше понимаем, что слишком мало знаем об этом уникальном озере, или, перефразируя классика, «Байкал так же неисчерпаем, как и атом». К сожалению, многолетний провал в финансировании затормозил наши исследования, однако в последние годы удалось не просто возобновить, но и существенно

расширить круг междисциплинарных исследований Байкала, для чего создаются новые приборы, разрабатываются новые методы и технологии исследований озера. Что особенно важно, основной объем работ выполняется студентами, аспирантами и молодыми учеными Иркутского государственного университета. Так что, надеемся, в будущем еще будут поводы вернуться к этой столь интересной теме. ■

Литература

1. Буднев Н.М. Лаборатория в водах Байкала // Природа. 2011. №12. С.11—22.
2. Безруков Л.Б., Буднев Н.М., Гальперин М.Д. и др. О свечении глубинных вод озера Байкал // Докл. АН ССР. 1984. Т.227. №5. С.1240—1244.
3. Ильичев В.И., Кобылянский В.В., Мойсейченко В.В. и др. Световой фон океана. М., 1990.
4. Безруков Л.Б., Буднев Н.М., Бутин Н.П. и др. Высокочувствительный батифотометр и исследования светового поля // Океанология. 1988. Т.28. Вып.2. С.331—335.
5. Безруков Л.Б., Буднев Н.М., Гресс О.А. и др. Свечение водной среды оз.Байкал — инструмент исследования динамики озера // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т.34. №1. С.97—103.
6. Белолаптиков И.А., Безруков Л.Б., Борисовец Б.А. и др. О нестационарности потоков глубинных байкальских вод по данным нейтринного телескопа // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т.34. №1. С.90—96.
7. Таращанский Б.А., Коханенко Г.П., Миргазов Р.Р. и др. Методы и результаты мониторинга оптических характеристик водной среды байкальского нейтринного телескопа, осуществляемого стационарным глубоководным прибором ASP-15 // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т.23. №9. С.793—802.
8. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380—700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurement // Applied optics. 1997. V.36. №33. P.8710—8723.
9. Heller W., Bhatnagar H.L., Nakagaki M. Theoretical investigation on the light scattering of spheres. XIII. The «wavelength exponent» of differential turbidity spectra // J. Chem. Phys. 1962. V.36. №5. P.1163—1170.
10. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами М., 1986.
11. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. М., 1951.
12. Пелевин В.Н., Ростовцева В.В. Оценка концентрации светопоглощающих и светорассеивающих веществ в различного типа водах открытого океана // Оптика атмосферы и океана, 1997. Т.10. С.989—995
13. Буднев Н.М., Ильин Н.В., Орлов И.И. и др. О частотной дисперсии потерь при акустическом зондировании воды оз.Байкал // Докл. РАН. 2011. Т.439. №3. С.1—4.