

УДК 574.5(282.65)

Тыныбеков А.К. ,

канд. физико-математических наук, с.н.с.

Жунушов А.Т.,

член-корреспондент НАН КР, доктор ветеринарных наук, профессор

Азаматов Н.А.

Специалист Международного научного центра

БИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА ОЗЕРА ИССЫК-КУЛЬ

Аннотация. Впервые была исследована температура воды, подводная освещенность, концентрация и фотохимическая активность фитопланктона с помощью насоса и зондового метода с использованием погружного флуориметра в юго-западном районе озера Иссык-Куль. Были сделаны графики глубины, температуры воды, распределения и активности сообщества фитопланктона. Обнаружен олиготрофный характер большей части озера Иссык-Куль и ответственность частей за эвтрофикацию.

Ключевые слова: фитопланктон, флуоресценция, хлорофил, фотосинтез, антропогенное загрязнение.

ЫСЫК-КӨЛ КӨЛҮНҮН ФИТОПЛАНКТОНУН ИЗИЛДӨӨНҮН БИОФИЗИКАЛЫК МЕТОДДОРУ

Аннотация. Биринчи жолу Ысык-Көлдүн түштүк-батыш жагындагы районго матырылган флуориметрди пайдаланып, соргуч жана зондук методдунун жардамы менен суунун температурасы, анын түбүндөгү жарыктыктыгы, фитопланктондун концентрациясы жана фотохимиялык активдүүлүгү изилденди. Фитопланктон менен бирге топтун бөлүштүрүлүшү, активдүүлүгүн аныктоо менен бирге суунун температурасы өлчөнүп, тереңдиги графикке түшүрүлдү. Ысык-Көл көлүнүн көп бөлүгүнөн олиготрофтук мүнөзү байкалып, алар эвтрофикацияга жооптуулугу белгиленди.

Негизги сөздөр: фитопланктон, флуоресценция, хлорофил, фотосинтез, антропогендик булгануу.

BIOPHYSICAL METHODS OF STUDY OF PHYTOPLANKTON OF LAKE ISSYK KUL

Abstract. First time the water temperature, underwater irradiance, concentration and photochemical activity of phytoplankton was investigated with pump and probe method using the submersible fluorimeter in south-west region of Issyk-kul lake. Graphs of depth, water temperature, distribution and activity of phytoplankton community were made. The oligotrophic nature of more parts of Issyk-Kul lake and liability of parts to eutrophication was discovered.

Key words: phytoplankton, fluorescence, chlorophyll, photosynthesis, anthropogenic pollution.

На долю водорослей приходится почти половина фотосинтетической биологической продукции Земли. В водных экосистемах фитопланктон (планктонные микроводоросли) является одним из главных источников органического вещества. Поэтому для характеристики состояния водной среды необходимо определять обилие и состояние природного фитопланктона. Количество водорослей обычно оценивают по содержанию в них хлорофилла спектрофотометрическим методом. Более оперативным и чувствительным для решения этой задачи являются измерения интенсивности флуоресценции водорослей в природной воде. Флуоресцентный метод оценки концентрации хлорофилла и, соответственно, обилия водорослей нашел широкое применение в экологии и гидробиологии как при работе с интактными водорослями, так и с экстрагированными из них растворами пигментов.

Эти методы обладают высокой чувствительностью, производительностью, точностью и позволяют проводить измерения *in situ* в режиме реального времени, что очень важно для решения экологических проблем, а также в биотехнологических работах для оценки работы фотосинтетического аппарата водорослей при культивировании в разных условиях. Основа флуоресцентных методов состоит в том, что хлорофилл, находящийся в фотосинтетических мембранах, служит природным индикатором состояния клеток растений. При нарушении состояния клеток под воздействием неблагоприятных условий про-

исходят изменения флуоресценции хлорофилла, которые и служат источником информации.

Определение обилия фитопланктона по интенсивности флуоресценции хлорофилла в составе фитопланктона используется в работах российских и зарубежных гидробиологов и экологов. Функционирование фотосинтезирующих организмов определяет существование почти всех экологических систем на земле. Около 1 % солнечной энергии, падающей на Землю, поглощается наземными растениями и водорослями и в результате их фотосинтеза образуется 50–150 млрд. тонн органического вещества ежегодно. Это органическое вещество потребляется растительноядными организмами, которыми, в свою очередь, питаются хищники и человек. Кроме того, состав современной атмосферы поддерживается за счет фотосинтетического выделения O_2 и поглощения CO_2 . На процессы дыхания в живых организмах и на сжигание всех видов топлива в совокупности на Земле расходуется около 10000 тонн O_2 в секунду, который восполняется за счет фотосинтеза наземных растений и водорослей (Рис. 1). Поэтому в связи с глобальным значением процесса фотосинтеза для существования жизни на Земле важным является разработка методов оперативного контроля за состоянием этого процесса. Особенно это важно для природного морского фитопланктона из обширных районах мирового океана, который играет важнейшую роль в фиксации и складировании на дно океана избытка CO_2 в атмосфере.

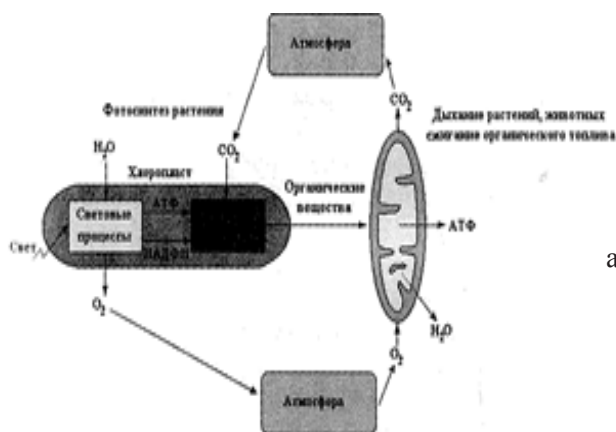


Рис. 1. Круговорот O_2 и CO_2 в современной атмосфере. При фотосинтезе наземных растений и водорослей в атмосферу выделяется O_2 и фиксируется CO_2 , с другой стороны процессы дыхания растений, животных и сжигание органического топлива приводят к потреблению O_2 и выделению CO_2 .

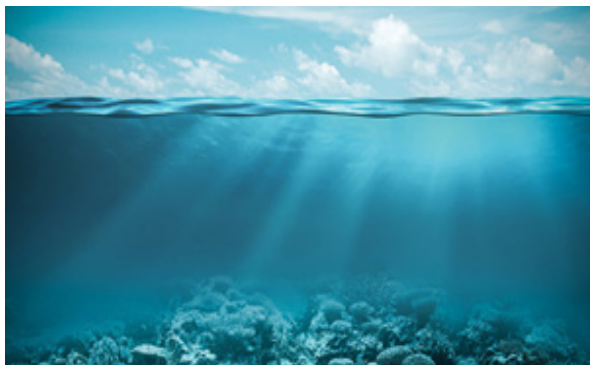


Рис.2.

Фотосинтез, в котором генерируется флуоресценция хлорофилла, является ключевым звеном сложной системы метаболизма, обеспечивающей в итоге рост и развитие растений и водорослей. В фотосинтезе происходит преобразование энергии света в энергию химических связей продуктов фотосинтеза [Кочубей, 2001; Кукушкин, Тихонов, 1988; Рубин и др., 1987; Рубин, 2000; Рубин, 2005; Тихонов, 1997].



Организация фотосинтетического аппарата (ФСА) включает разные функциональные уровни:

- процессы поглощения световой энергии в светособирающих пигментных антеннах;
- реакции фотохимического преобразования поглощенной энергии в энергию разделенных зарядов в реакционных центрах фотосистемы 1 и 2 (РЦ ФС1 и 2);
- электронный транспорт и сопряженные реакции образования АТФ в тилакоидных мембранах;
- темновые ферментативные реакции в строме хлоропласта (цикл Кальвина);

Несмотря на большое разнообразие в организации фотосинтетического аппарата различных типов и классов фотосинтезирующих организмов (хлоропласты, хромаатофоры, отдельные тилакоиды, различия в наборе пигментов и т.д.), существует удивительная универсальность в структуре первичных этапов трансформации свето-

вой энергии в химическую. Начальная фаза фотосинтеза – световая стадия, в ходе которой осуществляется поглощение и фотохимическое преобразование энергии света (Рис.2.). У наземных растений и у водорослей световая стадия протекает в тилакоидных мембранах с участием пяти типов надмолекулярных белков и пигмент-белковых комплексов. Два из них хлорофилл-белковые комплексы первой и второй фотосистем (ФС1 и ФС2) – несут реакционные центры (РЦ), в которых происходит первичная конверсия световой энергии, а также молекулы хлорофилла *a*. Последние выполняют функции внутренней антенны и обеспечивают эффективную миграцию энергии в пределах комплекса к РЦ.

Поглощение света молекулами пигментов есть первый акт запасания энергии при фотосинтезе. Главным пигментом зеленых растений и водорослей является хлорофилл *a*. После поглощения кванта света молекула пигмента переходит из основного S_0 (невозбужденного) в возбужденное состояние (S^*). Происходит переход одного из двух лг-электронов с низкой энергетической орбиты на более высокую.

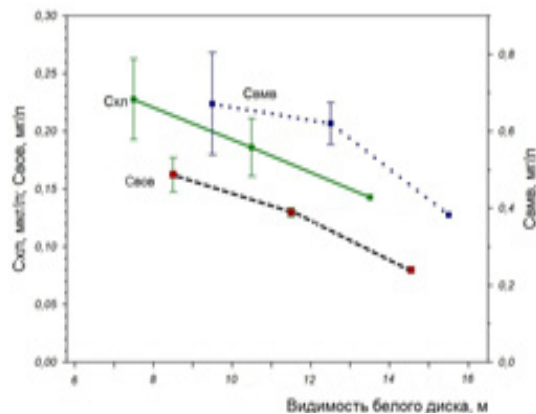


Рис.2. Связь между относительной прозрачностью воды и концентрациями взвешенных веществ и хлорофилла.

Существует два наиболее вероятных для молекулы хлорофилла синглетных возбужденных уровней: более высокий (S^*_g) при поглощении синего и более низкий (S^*_r) при поглощении красного света. Это определяет наличие в спектре поглощения хлорофилла двух главных пиков, синего и

красного максимума. При этом поглощение кванта синего света электрон, попав на более высокий энергетический уровень, тотчас же переходит обратно на «красную» орбиту, причем слишком быстро, чтобы совершить при этом какую-либо полезную химическую работу, разменивая энергию в тепло.

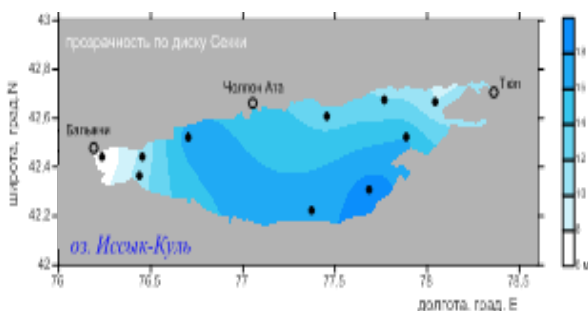


Рис.3. Распределение относительной прозрачности (максимальной глубины видимости диска Секки) – Н (в м).

Изображенное на рис.3. свидетельствует о том, что наиболее прозрачные воды озера (видимость диска – до 19 м) находятся в южной его части, а зона с наимень-

шей прозрачностью расположена в западной прибрежной акватории, где видимость диска снижается до 6 м. В восточной части озера прозрачность имеет промежуточные значения.

Солнечный свет в озере важен по многим причинам: он нагревает озерную воду через верхние слои, снабжает фитопланктон необходимой энергией, используется животными живущими у поверхности: и отражённый подповерхностный свет используется для картирования концентрации хлорофилла из космоса.

Одним из путей дезактивации возбуждения (перехода молекулы из состояния S^*iv в основное состояние) наряду с тепловой диссипацией и использованием при фотосинтезе является испускание квантов красного света, называемое флуоресценцией. Флуоресценция испускается при переходе молекулы из возбужденного синглетного состояния в основное. Время жизни флуоресценции для хлорофилла в растениях составляет 10^{-10} – 10^{-9} с.[1].

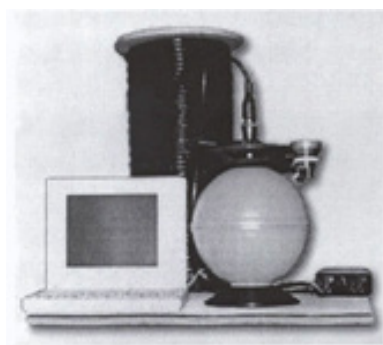


Рис.4. Погружной импульсный флуориметр используемый для измерений.

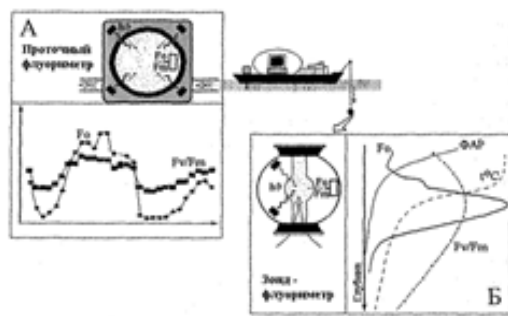


Рис.5. схема зондирования природного фитопланктона с использованием проточной (А) и зондовой (Б) флуориметрии. А – схема проточного флуориметра и его регистрируемые параметры: F0 (обилие фитопланктона, отн.ед.), Fv/Fm (фотосинтетическая активность), с параллельным снятием координат (JPS) и времени суток; Б – схема зондирования погружным флуориметром с регистрацией параметров флуоресценции F0, Fv/Fm, температуры (T°C), фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Погружной компактный зонд-флуориметр, разработанный на кафедре биофизики МГУ [Маторин и др., 1996, 2010] (Рис.4,5.) способен работать до глубины 200 м и измерять параметры флуоресценции (F0, Fm и Fv/Fv) природного фитопланктона в есте-

ственных условиях с одновременной регистрацией температуры и подводной облученности. Прибор состоит из погружаемого прочного корпуса с электронной и оптической системами измерения, блока питания и компьютера, управляющего процессом

измерений по программе, задаваемой пользователем. Регистрирующая часть зонда состоит из фотоумножителя, усилителя сигналов, аналого-цифрового преобразователя, интерфейса связи с компьютером и двух независимых импульсных источников света с длительностью вспышек 0,01 мс (спектральная область 400–480 нм).

Измерение всех параметров производится автоматически, и результаты выводятся на экран компьютера в реальном времени по мере погружения аппарата в виде графиков, отражающих вертикальный профиль температуры, подводной облученности, величин F_0 , а также концентрацию хлорофилла a , рассчитанную по величине F_0 в соответствии с калибровкой и показателем эффективности фотосинтеза водорослей F_v/F_m .

Наличие малогабаритного аккумулятора (12 В) позволяет использовать зонд при работе в полевых условиях с небольшой весельной лодки. С помощью этого флуориметра может быть получена информация

об экологическом состоянии разных водоемов, построены глубинные разрезы и трехмерные карты распределения количества и активности фитопланктонных сообществ, температурных и оптических параметров водной среды и выявлены районы, подверженные антропогенному загрязнению. Быстрое выяснение распределения количества и активности фитопланктона является актуальной задачей при обследовании больших водных акваторий. Такой подход позволяет определить пространственную структуру фитопланктонного сообщества и оценить его функциональное состояние. Эта информация важна для выбора типичных или градиентных зон обследуемой акватории. Большой массив данных, получаемых по ходу судна, позволяет сопоставить их со спутниковыми картами распределения хлорофилла в море. Такое сопоставление может способствовать уточнению алгоритмов расчетов содержания хлорофилла по показателям спектральной яркости, получаемой со спутников.

Таблица 1. Измеряемые и рассчитанные параметры флуоресценции в JIP-тесте [Strasseretai, 2004]

| Измеряем | параметры флуоресценции |
|-----------------|---|
| F_0 | Интенсивность флуоресценции при 50 мкс |
| F_j | Интенсивность флуоресценции при 2 мс |
| F_s | Интенсивность флуоресценции при 20 мс |
| $F_P(=F_m)$ | Максимальный выход флуоресценции |
| F_{100MKS} | Интенсивность флуоресценции при 100 мкс |
| F_{300MKS} | Интенсивность флуоресценции при 300 мкс |
| F_{6c} | Интенсивность флуоресценции при 6 с |
| $t(F_m)$ | Время (мс) достижения максимальной флуоресценции F_m |
| Area | Площадь между кинетической кривой флуоресценции (0-J-I-P) и уровнем F_m |

Таблица 2. (продолжение). Измеряемые и рассчитанные параметры флуоресценции в ЛР-тесте [Strasser et al., 2004]

| Измеряем | параметры флуоресценции |
|--------------------------------------|---|
| $F_v = F_m - F_0$ | Максимальная переменная флуоресценция |
| $V_j = (F_j - F_0) / F_v$ | Относительная амплитуда O-J фазы |
| $V^{\wedge}CF_r = F_j J / F_v$ | Относительная амплитуда J-I фазы |
| $M_0 = 4 - (F_{300MKC} - F_0) / F_v$ | Начальный наклон фазы O-J роста флуоресценции |
| $SM = (Area) / F_v$ | Площадь между кинетической кривой флуоресценции (O-J-I-P) и уровнем F_m , нормированная на величину F_v |
| $E_{To}/ABS = (F_v / F_m) (1 - V_j)$ | Квантовый выход электронного транспорта |
| $qE = (F_m - F_{6s}) / F_v$ | Способность к рН-индуцированному нефотохимическому тушению флуоресценции |
| $qPQ = (F_m - F_i) / F_v$ | Способность пула хинонов тушить флуоресценцию |

Интенсивность флуоресценции образца воды, содержащего фитопланктон, определяется уравнением:

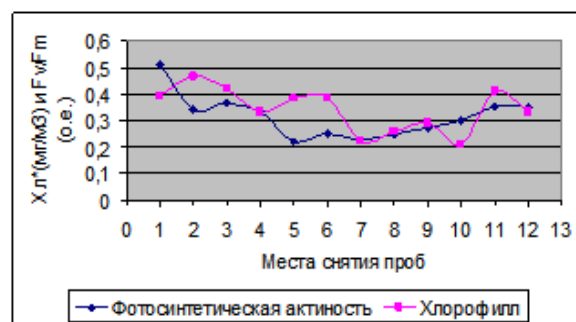
$$F_0 = G \times N \times qF_0 \times lexc \int i(\lambda) \times S(\lambda) \quad (1)$$

где, N – концентрация фотосинтетических реакционных центров в единице объема воды; $S(X)$ – поперечное сечение поглощения светособирающей антенны одного реакционного центра, зависящее от длины волны возбуждающего света (то есть спектр поглощения комплекса светособирающих пигментов реакционного центра); $lexc(X)$ – абсолютное спектральное распределение интенсивности света, возбуждающего флуоресценцию $lexc = lexc(X)$ – интегральная интенсивность возбуждающего света; $i(X) = lexc(X) / lexc$ – нормированная функция спектрального распределения возбуждающего света; qF_0 – квантовый выход флуоресценции при открытых реакционных центрах; и C – фактор зависящий от геометрии светосбора и чувствительности устройства, регистрирующего интенсивность флуоресценции.

$$F_0 = G \times N \times qF_0 \times lexc \times S(\lambda) \quad (2)$$

где $S = i(X) * S(X)$ – поперечное сечение поглощения одного реакционного центра (размер светособирающей антенны) для данного спектрального распределения воз-

буждающего света $i(X)$ При равномерном спектральном распределении возбуждающего света ($i(X) = const$), S – интеграл спектра поглощения светособирающей антенны.

Рис. 6. Горизонтальное распределение параметров флуоресценции $F_0(Xl^*)$ и F_v/F_m

Таким образом, интенсивность флуоресценции F_0 пропорциональна суммарной величине светособирающей антенны ($N * S$) всего фитопланктона, находящегося в единице объема воды, то есть является наиболее адекватным показателем обилия фитопланктона, характеризующим количество света поглощаемого данной популяцией фитопланктона. Параметр F_0 более пригоден для количественной оценки содержания фитопланктона, чем измерения концентрации хлорофилла a , если полоса возбуждения флуоресценции в используемом приборе охватывает весь спектральный диапазон фотосинтетической актив-

ной радиации от 400 до 650 нм [Matorin *et al.*, 2004].

С другой стороны возбуждение флуоресценции в разных полосах поглощения характерных дополнительных пигментов в настоящее время используется для оценки количественного соотношения разных групп водорослей в смешанной популяции фитопланктона с использованием флуоресценции [Beutler *et al.*, 2002]. Имеются серийный погружной прибор (BBE Kiel, Германия) (www.bbe-moldaenke.de) и лабораторный флуориметр РНУТОРАМ (HeinzWalz GmbH, Германия) (www.walz.com), в которых этот принцип реализован.

Регистрация разработанным погружным флуориметром количества фитопланктона по F_0 , фотосинтетической активности по F_v/F_m и интенсивности освещения на данном горизонте позволяет оценить фотосинтетическую продукцию, которая может быть откалибрована для каждого водоема по классическим методам с использованием радиоактивного углерода ^{14}C . Поскольку световые зависимости продукции могут быть нелинейными, для улучшения корреляции можно вводить дополнительные уточняющие коэффициенты [Антал, 2000; Антал *et al.*, 2001; Ostrowska, 2001].

Зависимость скорости фотосинтеза от интенсивности действующего света описывается уравнением:

$$\Phi_{max} = \frac{K}{A} \times F_0 \frac{F_u}{F_m} \times I_{act} \quad (5)$$

где, qP – квантовый выход фотосинтеза ($qP = qZ \cdot K$, где K – стехиометрический коэффициент продукт/квант, равный, например, для кислорода 1/8); Φ – скорость фотосинтеза, Φ_{max} – скорость фотосинтеза при насыщающей интенсивности света; V – скорость разделения зарядов в реакционном центре, а остальные обозначения как в (1 и 2).

Выражая концентрацию реакционных центров через F_0 по уравнению (2), учитывая равенство $qZ = F_v/F_m$ и обозначив $A = G \cdot qF_0 \cdot I_{exc}$, можно связать скорость фотосинтеза с параметрами флуоресценции фитопланктона:

$$\Phi = \frac{F_0}{A \cdot S} \times \frac{I_{act} \times \Phi_{max}}{I_{act} + \Phi_{max} / K \times \frac{F_v}{F_m} \times S} \quad (4)$$

Очевидно, что при интенсивности света меньше той, которая требуется для насыщения фотосинтеза ($V < \Phi_{max}$), скорость фотосинтеза равна:

$$\Phi_{max} = \frac{K}{A} \times F_0 \frac{F_u}{F_m} \times I_{act} \quad (5)$$

независимо от таксономического состава фитопланктона, при условии, что спектральное распределение возбуждающего флуоресценцию света близко к таковому для естественной подводной освещенности. В нашей реализации флуориметра не предпринято специальных мер для подгонки спектрального состава 'возбуждающего света к естественному свету, однако, следует отметить, что эти два распределения, по-видимому, не слишком сильно отличаются друг от друга. Спектр излучения применяемых ксеноновых ламп сходен со спектром солнечного света, а полоса пропускания светофильтра СЗС-22, выделяющего спектральную область от 400 до 650 нм близка к полосе пропускания воды. Более точные результаты можно получить, прокалибровав показания прибора для разных групп фитопланктона с различным составом пигментов, и определяя при измерениях преобладающую таксономическую группу фитопланктона.

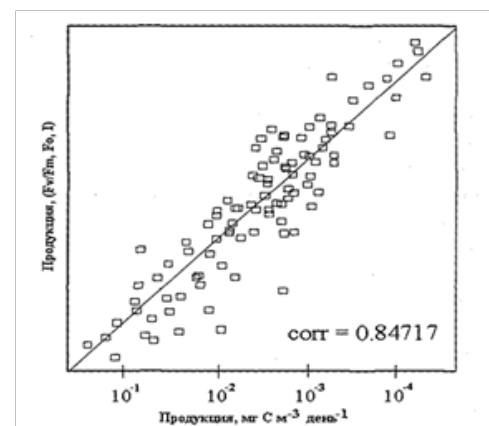


Рис. 7. Корреляция между продукцией, рассчитанной из F_v/F_m , F_0 и интенсивности освещения, и продукцией, определенной по фиксации ^{14}C , для летнего фитопланктона.

Важную информацию о состоянии фотосинтетического аппарата водорослей дает отношение F_v/F_m , которое соответствует максимальной величине эффективности первичных стадий утилизации света в ФС2. Проведенные эксперименты с помощью разработанной погружной аппаратуры обнаружили существенную пространственно-временную неоднородность распределения активности ФС2 у природных популяций фитопланктона. Во многих водоемах максимальная квантовая эффективность ФС2 не всегда совпадает с максимумом концентрации фитопланктона. При этом часто максимальная эффективность фотосинтетического аппарата, коррелирует с обеспеченностью минеральным питанием фитопланктона.

Применение дистанционного зондирования для оценки концентрации фитопланктона в верхнем слое и его первичной продуктивности основана на оптических свойствах пигмента фитопланктона. Известно, что пигмент фитопланктона поглощает энергию преимущественно в голубой и красной зонах спектра и отражает в зеленой. Таким образом, существует определенное соотношение между спектральным отражением поверхностного слоя и содержанием в нем пигментов фитопланктона. Соотношение яркости в голубой и зеленой спектральных зонах и определяет цвет воды («цветовой индекс»). На основании полученных *in situ* количественных зависимостей цветового индекса от концентрации фитопланктона и определяют содержание фотосинтезирующего пигмента (хлорофилла – зеленого пигмента рас-

тительных клеток, играющего основную роль в фотосинтезе).

Зависимость активности ФС2 от концентрации биогенных элементов в воде наблюдалась также при измерении глубинных профилей. В олиготрофных водах активность ФС2 была минимальна в поверхностных горизонтах и увеличивалась с глубиной. Подобные зависимости были получены в на озере Иссык-Куль, который представляет собой крупный незамерзающий слабосоленый глубоководный водоем площадью 6200 км² [Matorinetal., 2001]. Вертикальное распределение флуоресценции в глубоководных районах озера зависело от структуры вод, изменение которой определяли по температуре. В верхнем перемешиваемом слое глубиной до 10–15 м, который характеризовался однородным распределением температуры, регистрировали преимущественно низкие значения F_0 и F_v/F_m как в облачные, так и в солнечные дни, однако, в последнем случае уменьшение флуоресценции в верхних водах было более значительным. Снижение обоих параметров флуоресценции в верхнем слое было обусловлено, главным образом, низким содержанием основных биогенных элементов (концентрация солей азота в этом слое в центральных районах озера составляла в среднем 0.2 мг/л^л, а солей фосфора – 0.18 мг/л^л). Наибольшую интенсивность F_0 в пелагиали оз. Иссык-Куль регистрировали на глубине 40–50 м под термоклином, где существовала подпитка минеральными солями с глубоководных горизонтов и освещенность была достаточной для развития водорослей.

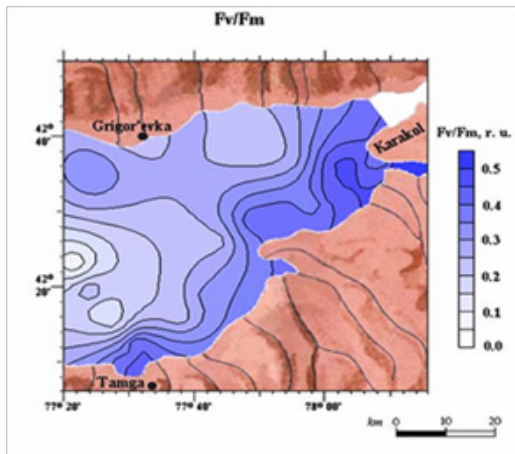


Рис.8. Карта фотосинтетической активности (Fv/Fm) фитопланктона на поверхности (глубина до 10 м) в юго-восточной части озера Иссык-Куль/ /.

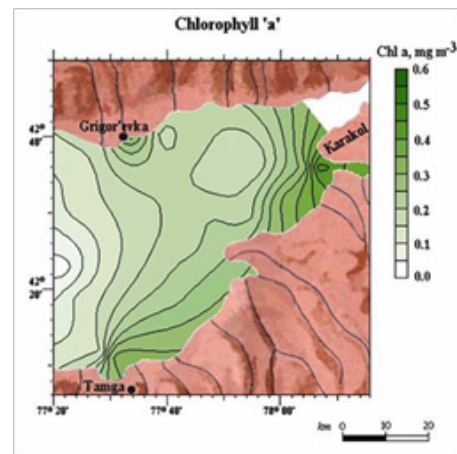


Рис. 9. Карта распределения фитопланктона на поверхности (глубина до 10м) в юго-восточной части озера Иссык-Куль/ /.

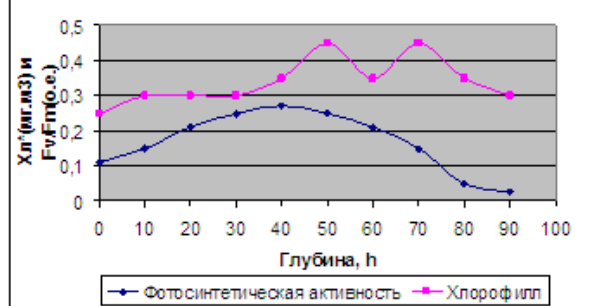
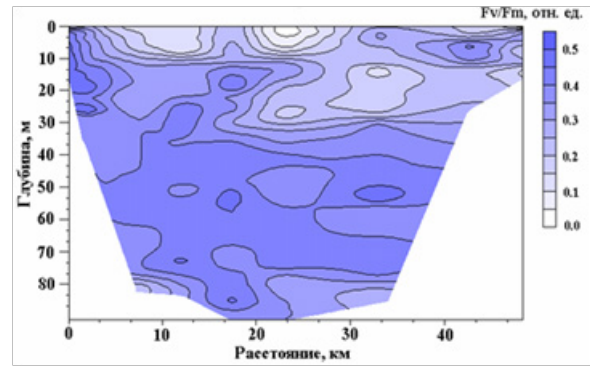
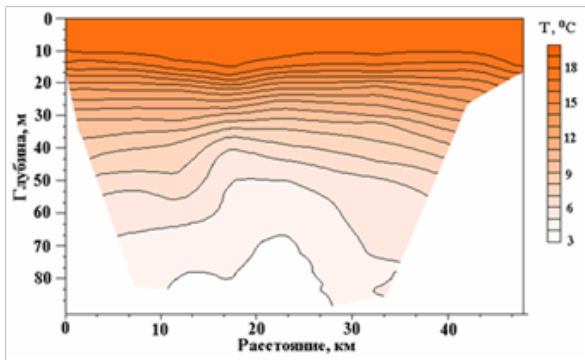
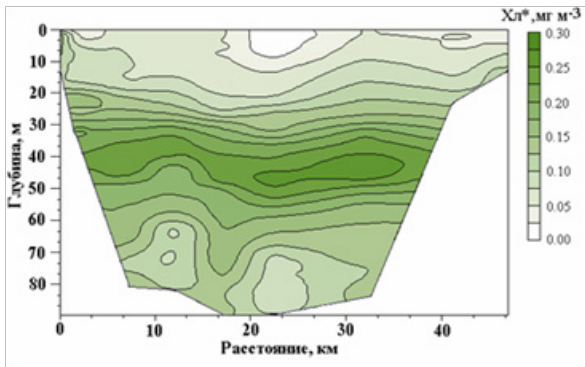


Рис.11. Вертикальное распределения параметров флуоресценции Fo(Хл*) и Fv/Fm

Рис.10. Распределение по глубине значений Fo, выраженных в единицах концентрации хлорофилла (Хл*, мг м-3) (А), активности Fv/Fm (В) и температуры (С) в разрезе Тамга – Григорьевка поперек оз. Иссык-Куль. Распределение по акватории значений Fo (D), Fv/Fm (E) и концентрации неорганического азота (F) в восточной части озера Иссык-Куль. Данные получены с использованием зонда-флуориметра.

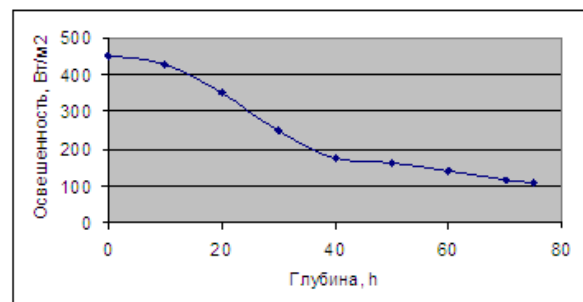


Рис.12. Подводная освещенность по глубине оз. Иссык-Куль

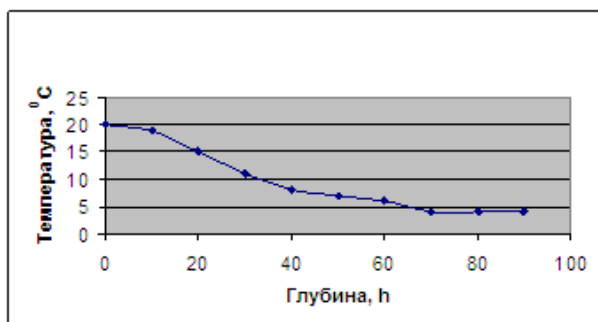


Рис.13. Распределение температуры по глубине оз. Иссык-Куль

Так, концентрация нитратов в этом слое составила 0.6 мг л^{-1} , а количество проникающей ФАР – $0.3\text{--}0.5 \%$ от величины на поверхности. Величина F_v/F_m на этой глубине также достигала наибольших значений, но, в отличие от выхода F_0 , снижавшегося на более глубоких горизонтах, практически не изменялась до максимальной измеренной глубины 100 м, где интенсивность света была ниже 0.04% от поверхностной.

При исследовании распределения флуоресценции по акватории озера Иссык-Куль наглядно прослеживалась связь между параметрами флуоресценции фитопланктона и концентрацией биогенов. Построенные карты горизонтального распределения значений $F_0\{Xn^*\}$, F_v/F_m и концентрации неорганического азота в восточной части озера Иссык-Куль показали что, распределение показателей флуоресценции в целом коррелировало с содержанием неорганического азота в воде, который является одним из наиболее важных компонентов минерального питания.

Наибольшая концентрация этого элемента приходилась на прибрежные районы вдоль линии Каракол-Тамга, что было связано с менее гористой местностью в этом районе и, соответственно, большим обогащением притоков почвенными частицами.

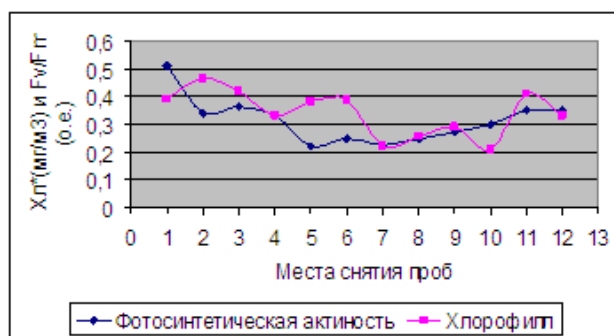


Рис.14. Горизонтальное распределение параметров флуоресценции $F_0(Xl^*)$ и F_v/F_m

Вдоль этой линии побережья обнаружена связь между содержанием минеральных веществ и интенсивностью флуоресценции фитопланктона. Наибольшие значения обоих параметров флуоресценции приходились на залив Каракол, где наблюдалась повышенная концентрация минеральных веществ.

На станциях юго-восточной части озера при помощи погружного зонда были измерены *in situ* вертикальные профили температуры, подводной освещенности, обилия (по F_0) и фотохимическая активность РЦ ФС 2 (по F_v/F_m), по которым строили пространственные разрезы указанных характеристик (рис. 7, 8 9). Параллельно с зондированием фитопланктона с поверхности проводился отбор проб для определения химических параметров воды.

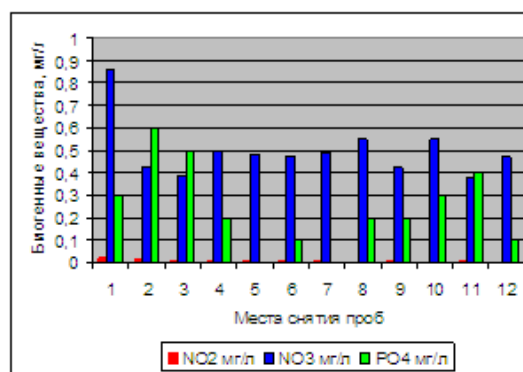


Рис.15. Концентрация нитратов и фосфатов

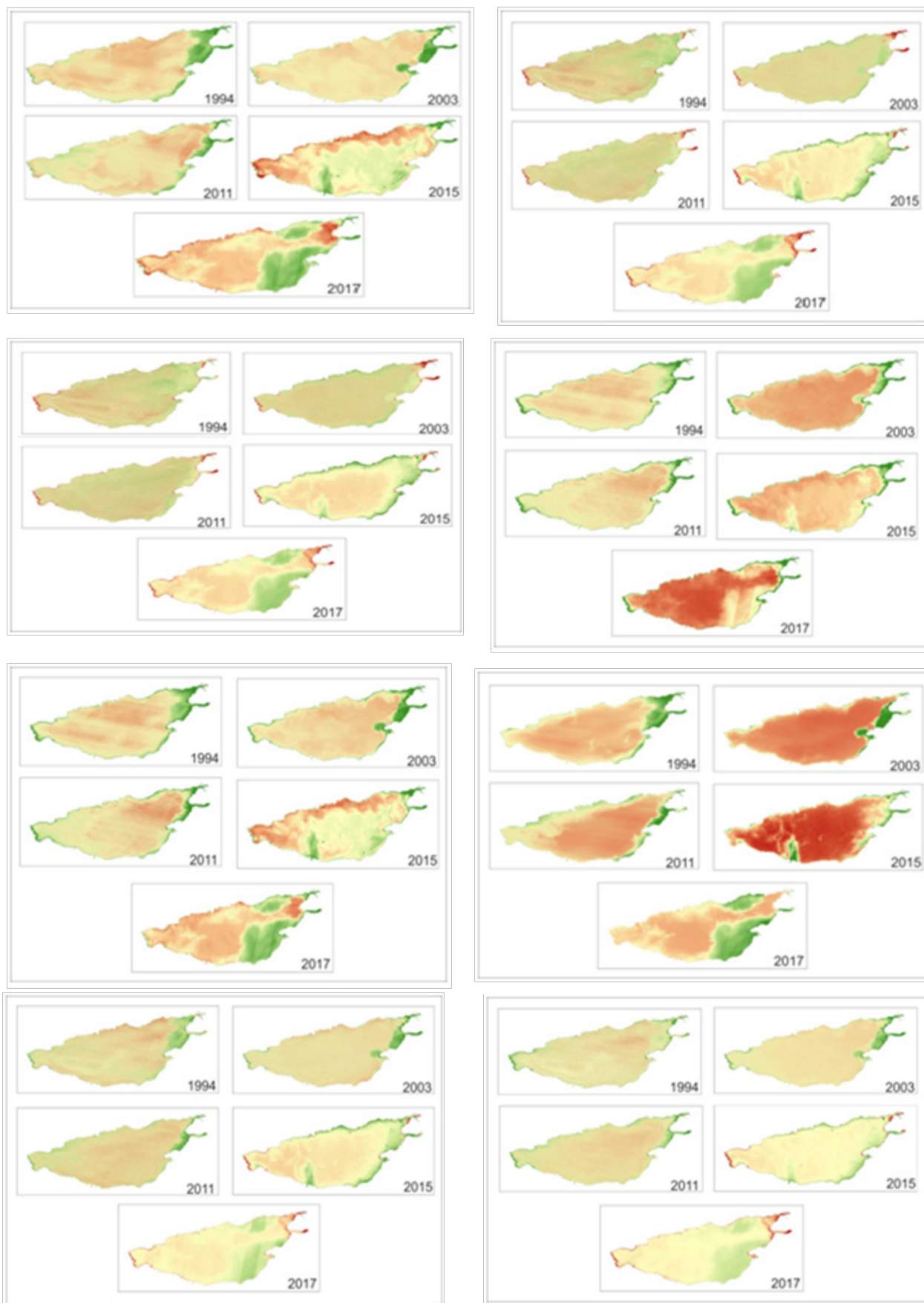


Рис.16. Спутниковые снимки озера Иссык-Куль в различных диапазонах

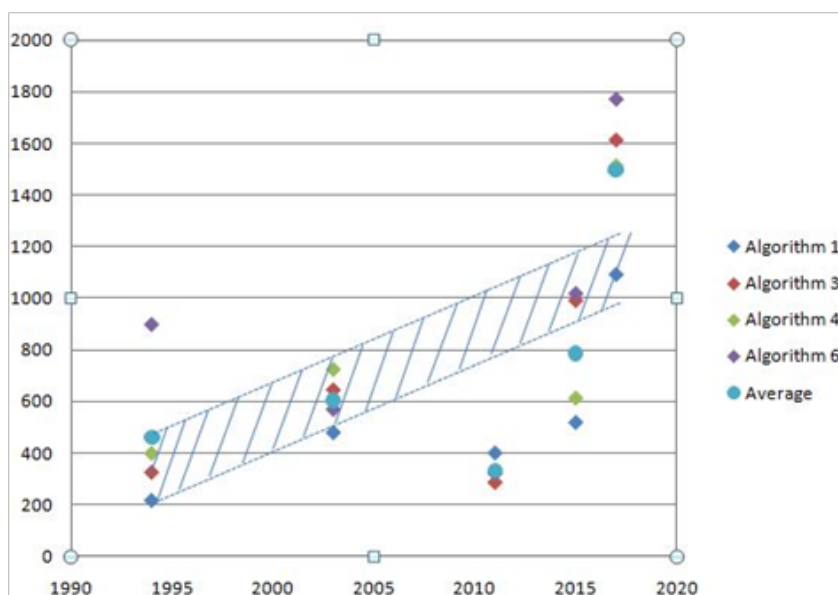


Рис.17. Увеличение биогенных площадей/4/.

Интересно, что увеличение активности фотосинтеза и появление клеток с высоким значением F_v/F_m предшествует периоду цветения, который сопровождается резким увеличением концентрации фитопланктона в водоемах. То есть, высокие значения активности при низких концентрациях клеток могут свидетельствовать о том, что популяция фитопланктона находится на ранних этапах развития, предшествующих цветению. Обилие фитопланктона выражали в единицах концентрации хлорофилла (Хл*), предварительно откалибровав в лабораторных условиях выход сигнала F_0 по концентрации хлорофилла а, а также проведены анализы горизонтального рас-

пределения параметров флуоресценции фитопланктона в верхнем перемешиваемом слое оз. Иссык-Куль на глубине до 10 метров (средняя температура – 17,93°C) рис.10. и в заливах.

Высокая активность ФС2 при низкой концентрации водорослей может наблюдаться не только перед цветением во время сезонных сукцессии фитопланктона, но и в районах апвеллинга, в том числе, в областях локальных циркулярных течений, образованных фронтальным взаимодействием водных масс, где создаются условия для интенсивного развития популяций фитопланктона.

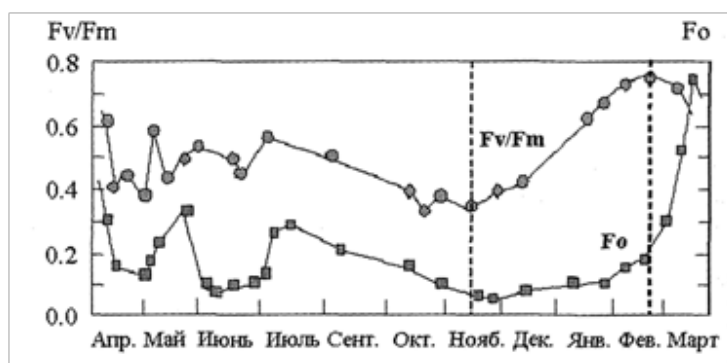


Рис.18. Сезонная динамика параметров флуоресценции фитопланктона F_0 и F_v/F_m . Увеличение F_v/F_m в феврале-марте перед периодом весеннего цветения.

Т.о., использование погружного флуоресцентного зонда наиболее целесообразно использовать при подробной съемке (например, при выявлении мезомасштабных структур) с большим количеством станций, когда использование стандартных методов возможно только на небольшом количестве станций. Детальное исследование состояния фотосинтетического аппарата фитопланктона позволяет понять механизмы пространственно-временной изменчивости фитоценоза. Комплексный характер информации о первичных процессах фотосинтеза, получаемый с использованием погружного импульсного флуориметра в режиме реального времени, позволяет охарактеризовать продуктивность и физиологическое состояние фотосинтетического аппарата природных популяций фитопланктона и прогнозировать их будущее развитие в данном водоеме.

Известно, что содержание минеральных веществ на разных глубинах и подводная освещенность являются основными факторами, определяющими вертикальную структуру фитопланктона. В стратифицированных водах вертикальное распределение фитопланктона зависит также от изменения температуры, которую обычно используют как показатель стратификации. Вертикальное распределение флуоресценции в глубоководных районах озера зависело от структуры воды, изменение которой определяли по температуре. В верхнем перемешиваемом слое глубиной до 10–15 м, который характеризовался однородным распределением температуры, регистрировали преимущественно низкие значения F_0 и F_v/F_m как в облачные, так и в солнечные дни, однако, в последнем случае уменьшение флуоресценции в верхних водах было более значительным. Снижение обоих параметров флуоресценции в верхнем слое было обусловлено, главным образом, низким содержанием основных биогенных элементов (концентрация солей азота в этом слое в центральных районах озера составляла в среднем 0,2 мг/л, а солей фосфора – 0,18 мг/л). Наибольшую ин-

тенсивность F_0 в пелегалии оз. Иссык-Куль регистрировали на глубине 40–50 м под термоклинном, где существовала подпитка минеральными солями с глубоководных горизонтов, а освещенность была достаточной для развития водорослей. Так, концентрация нитратов в этом слое составила 0,6 мг/л, а количество проникающей ФАР – 0,3–0,5 % от величины на поверхности. Величина F_v/F_m на этой глубине также достигала наибольших значений, но, в отличие от выхода F_0 , снижавшегося на более глубоких горизонтах, практически не изменялась до максимальной измеренной глубины 100 м, где интенсивность света была ниже 0,04% от поверхностной [4].

Т.о., вертикальное распределение продукционных характеристик фитопланктона в центральных районах оз. Иссык-Куль, в основном, зависело от распределения элементов минерального питания и имело следующие особенности: 1) максимальному обилию фитопланктона под термоклинном соответствовала максимальная фотохимическая активность РЦ водорослей, которая сохранялась также под пиком максимальных значений обилия, где количество фитопланктона лимитировалось недостаточной освещенностью; 2) минимальные значения обилия и фотохимической активности РЦ водорослей наблюдались в верхнем перемешиваемом слое в условиях дефицита минеральных веществ и избыточной освещенности.

При исследовании распределения флуоресценции по акватории озера Иссык-Куль наглядно прослеживалась связь между параметрами флуоресценции фитопланктона и концентрацией биогенов. Построенные карты горизонтального распределения значений $F_0(X_{л*})$, F_v/F_m и концентрации неорганического азота в восточной части озера Иссык-Куль показали, что распределение показателей флуоресценции, в целом, коррелировало с содержанием неорганического азота в воде, который является одним из наиболее важных компонентов минерального питания. Наибольшая концентрация этого элемента

приходилась на прибрежные районы вдоль линии Каракол-Тамга, что связано с менее гористой местностью в этом районе и, соответственно, большим обогащением притоков почвенными частицами. Вдоль этой линии побережья мы также обнаружили связь между содержанием минеральных веществ и интенсивностью флуоресценции фитопланктона.

Т.о., измерение фитопланктона *in situ* с использованием погружного флуориметра позволило нам изучить характер распределения на станциях Иссык-Куля продукционных параметров водорослей, их обилие и фотохимическую активность, на которые влияют факторы среды.

Сравнение этих параметров с температурой и концентрацией солей азота и фосфора в пелагической и литеральной зонах озера показало, что наибольшее значение для обилия и фотосинтетической активности фитопланктона имеет концентрация биогенов и стратификация вод. Эти данные доказывают олиготрофный характер вод озера Иссык-Куля и подтверждаются тем, что оптимальные условия для роста и развития фитопланктона были на глубине 25–55 м. Клетки фитопланктона в поверхностных слоях имеют высокую чувствительность к появлению биогенов.

Чрезвычайно важной областью является использование подобной аппаратуры для биомониторинга влияния загрязнений на фитопланктонные популяции в природных водоемах, определения границ этого влияния и качества среды. Высокое количество и активность реакционных центров фотосинтеза была найдена в районах, где происходит принос с речной водой терригенных частиц. Т.о., фитопланктон может служить индикатором чистоты воды в озере Иссык-Куля, которое имеет важное значения для индустрии туризма и рекреация.

Литература:

Маторин Д.Н., Венедиктов П.С., Рубин А.Б. Использование двухвспышечного импульсного погружного флуориметра для определения фотосинтетической активности природного фитопланктона // Докл. РАН. – 1996. – Т. 350. – № 2. – 256–258 с.

Тыныбеков А.К., Маторин Д.Н. Использование погружного зонда флуориметра при определении фитопланктона озера Иссык-Куль, Вестник КРСУ, 2007, Том 7, № 6, – 127–132 с.

Тыныбеков А.К. Экспериментальное измерение фитопланктона оз. Иссык-Куль. Известия КГТУ, № 9, 2006, – 89–93 с.

Тыныбеков А.К. Состояние фитопланктона на озера Иссык-Куль, Бишкек, 2009. – 230 с.