

**ДИСТАНЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЗЕРА ИССЫК КУЛЬ****REMOTE SENSING FOR INVESTIGATE THE ISSYK KUL LAKE**

*Макалада Ысык-Көлдү изилдөөнүн жыйынтыктары чагылдырылган.*

*Ачык сөздөр: жерди аралыктан кароо, спектрдик чагылдыруу мүмкүнчүлүгү, күндүзгү жарыктын начарлашы, мониторинг, фотосинтез, фитопланктон.*

*В работе представлены результаты натурных исследований озера Иссык-Куль.*

*Ключевые слова: ддз, спектральная отражательная способность, ослабление дневного света, мониторинг, фотосинтез, фитопланктон.*

*The paper presents the in situ investigations Issyk - Kul lake.*

*Keywords: remote sensing, spectral reflectivity, the weakening of daylight, monitoring, photosynthesis, phytoplankton.*

В широком смысле дистанционное зондирование Земли - это получение любыми неконтактными методами информации о поверхности, объектах на ней или в ее недрах. Традиционно к ДДЗ относят только те методы, которые позволяют получить из космоса или с воздуха изображение земной поверхности в каких-либо участках электромагнитного спектра с использованием аппаратуры, установленной на борту космических аппаратов.

ДДЗ необходимы для ГИС поддержки регионального плана по сохранению биоразнообразия ЗТШ по нескольким причинам.

Во-первых, известно, что основные тематические карты (растительности, землепользования, лесов и др.), необходимые для анализа и поддержки принятия решений при разработке плана по сохранению БР для Кыргызской Республики, оцифровываются с бумажных оригиналов, которые созданы с космических снимков 1978 - 1980 гг., т.е. более 20-ти лет назад. Воздействие изменившихся социально-экономических условий в течение 20-25 лет на природно-хозяйственную среду региона привело к значительным изменениям природной среды.

Во-вторых, ДДЗ являются самым оперативным источником получения геоинформационных данных. Следовательно, они являются основным источником для поддержания информации ГИС в режиме реального времени, особенно если фактор реального времени играет значительную или решающую роль (контроль стихийных бедствий, экологический мониторинг, мониторинг природоохраняемых территорий и т.д.).

При дистанционных исследованиях можно получать информацию об объекте исследования в разных спектральных диапазонах: рентгеновском, ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном. Чем меньше длина волны, тем выше точность измерения положения объекта. Длины волн оптического диапазона меньше длин волн теплового или радиолокационного диапазона. Поэтому оптические наблюдения, фиксируемые на фотопленку или с помощью сканирующих устройств, более информативны и точны.

Определены цели и задачи анализа космических снимков территории Иссык-Кульского региона признаны актуальными следующие задачи:

- создание новых слоев карт, отвечающих современному состоянию экосистемы;
- коррекция границ, унификация и степень деградации экосистем по существующим векторным картам;
- определение современного состояния растительности;
- определение или коррекция границ пахотных земель и пастбищ.

- Границы деградации ледников

Так как такие данные можно получить только со снимков среднего или достаточно высокого разрешения, то возникает необходимость приобретения снимков с разрешением примерно 15 - 25 м.

В технологиях ДДЗ можно выделить три стадии: первая - поиск и приобретение данных дистанционного зондирования, вторая - предварительная цифровая обработка изображений, третья - классификация и интерпретация ДДЗ.

Первая стадия распадается на следующие этапы:

- Обзор и анализ данных дистанционного зондирования от разных сенсоров (спутников);
- Анализ требуемого разрешения, качества, временных параметров, формата, уровня обработки, количества кадров и стоимости снимков;
- Поиск данных дистанционного зондирования;
- Поиск поставщика данных дистанционного зондирования;
- Отбор данных дистанционного зондирования;
- Ведение рабочей переписки с поставщиками данных дистанционного зондирования;
- Просмотр отобранных данных дистанционного зондирования;
- Отслеживание качества заказанных данных дистанционного зондирования;
- Рекомендации по выбору параметров при заказе данных дистанционного зондирования у поставщика, включающие проекцию, формат самих данных и другие;
- Проверка качества полученных данных дистанционного зондирования;
- Разработка заказной спецификации и закупка.



Рис.1. Спутниковый снимок озера Иссык Куль

Для анализа и мониторинга изменений окружающей среды часто используются данные сенсора Landsat или Aster, имеющего 7 или 14 спектральных каналов с пространственным разрешением 30, 15, (видимый и ближний инфракрасный диапазон) и 90 (дальний ИК) метров. В большинстве случаев обрабатываются лишь первые три канала (1,2,4), имеющие пространственное разрешение 15 метров.

*Среди задач мониторинга и анализа изменений окружающей среды можно назвать несколько основных, которые можно решить при помощи обработки снимков камер Landsat или Aster анализ растительности, оценка деградации растительности, выявление вырубок, мониторинг мероприятий по сохранению окружающей среды, построение трехмерных моделей изучаемой территории и др.*

Типовые этапы обработки ДДЗ на второй технологической стадии.

1. Ввод данных;
2. Визуальный анализ данных;

3. Ректификация (регистрация) изображений;
4. Комбинирование изображений;
5. Улучшение качества изображений.

*На первом* этапе обработки осуществляется либо импорт данных, полученных со спутника, либо сканирование данных.

*Второй этап* предполагает обязательный анализ данных для последующего составления плана обработки изображений.

*На третьем* - осуществляется ректификация изображений. В случае необходимости оно может быть переведено в заданную картографическую проекцию.

*На четвертом* - возможно объединение или комбинирование нескольких изображений с целью получения целостной картины исследуемого объекта или явления.

*На пятом* этапе изображение, синтезированное из нескольких разных изображений, подвергается обработке с целью улучшения качества и приведения разных характеристик исходных изображений к единым характеристикам одного синтезированного изображения.

Среда для отображения снимков ENVI (Environment for Visualizing Images) является наиболее дешевым и в то же время достаточно простым в управлении программным обеспечением для работы с данными дистанционного зондирования [2].

ENVI приобретен для всех национальных групп ГИС и выполняет функции:

- по обработке и глубокому анализу многозональных снимков;
- по исправлению геометрических и радиометрических искажений;
- поддержки объемных растровых и векторных форматов;
- по интерактивному улучшению изображений;
- по интерактивному дешифрированию и классификации;
- выбору области обработки;
- векторного отображения, оцифровки;
- оформлению карт;
- по анализу снимков в радиодиапазоне.

В отличие от других пакетов по обработке снимков в ENVI встроен язык программирования IDL (Interactive Data Language), так что можно расширить функциональные возможности ENVI или создать собственные подпрограммы.

Открытая архитектура ENVI обеспечивает удобство обработки данных полученных со спутников ASTER, LANDSAT SPOT, RADARSAT, NOAA ESA и других.

Классификация представляет собой третью, наиболее сложную стадию обработки ДДЗ. На данной стадии осуществляется распознавание объектов, изображенных на космоснимке, а именно;

1. Классификация объектов изображений;
2. Организация таблиц атрибутивных данных,
3. Векторизация объектов изображений,
4. Формирование цифровых моделей,
5. Пост - классификационная обработка,
6. Подготовка карт

Для повышения качества распознавания объектов и улучшения качества векторизации растрового изображения на первом этапе осуществляются автоматизированная классификация объектов изображения и их группирование по свойствам (атрибутам) Благодаря этому существенно упрощается процесс организации атрибутивных данных. Второй этап создает основу для применения для ГИС – технологий. В нем происходит создание структур атрибутивных данных в соответствии с требованиями конкретной ГИС и формируется структура связей позиционных и атрибутивных данных

На третьем этапе осуществляется векторизация растрового изображения с использованием данных классификации и организованной связи «координаты-атрибуты». На этом этапе проводится существенное (на 2-3 порядка) сжатие исходных данных при сохранении информативности о выбранных объектах.

На четвертом этапе осуществляется построение цифровой модели как основы хранения данных и моделирования в ГИС.

На пятом этапе выполняются процедуры пост-классификационного моделирования, которые могут включать ряд процедур, таких как комбинирование объектов, ректификация, классификация и др. повторно. Цель этих процедур – более углубленное исследование объектов ГИС.

На шестом этапе результаты моделирования оформляются в виде карт, отчетов, справок, и других документов.

Сложность этого процесса состоит в том, что при классификации объектов космоснимка различными методами, создании векторных карт и атрибутивных таблиц должен быть использован личный или коллективный опыт специалистов (ботаников, лесников, почвоведов и др.), предварительно накопленный в базе знаний ENVI, а также опыт, приобретенный при построении векторных тематических карт.

При отсутствии базы знаний необходима детальная рекогносцировка на местности с GPS-приемником для сопоставления ДДЗ и реальных данных.

Таким образом, предварительный план обработки данных дистанционного зондирования может быть следующим:

1. Выбор и приобретение снимков ДЗ,
2. предварительная обработка снимков,
3. Подготовка библиотеки регионов интересов на основе векторных карт растительности землепользования, при помощи которых будет проведена классификация космоснимков,
4. Векторизация снимков и коррекция атрибутивных таблиц, окончательная коррекция карт с помощью узких специалистов и GPS-технологии и оценка точности результатов.

Для различных прикладных задач в настоящее время используются различные типы спутниковых снимков. Типичные технические параметры многоспектральных спутниковых снимков, обеспечивающих широкий спектр выполнения прикладных задач, показан в Табл.1. Так спутниковая система Landsat-7 имеет 6 спектральных диапазонов съемки, а спутниковые снимки Aster имеют 14 спектральных каналов. Такое количество спектральных каналов обеспечивает распознавание типов растительности, водных объектов, геологических и структур, определять температуру и влажность почв и решать другие тематические задачи. Однако, различные типы спутниковых снимков, имеют существенные отличия в яркостном диапазоне, при съемке одной и той же территории в одно и то же время. Корректно уровнять эти снимки можно только при наличии на снимке нескольких эталонных объектов с известной отражательной способностью.

Таблица-1 - Назначение спектральных каналов Спутниковых Систем типа Landsat-7 и Aster

№ канала	Длина волны, мкм	Пространственное разрешение, м	Назначение диапазона Landsat -7	Aster Длина волны (мкм) и пространственное разрешение (метр/ пиксель)
8	0.52-0.9	13x15		

1	0.45-0.52	30	Оценка хлорофилла каротина в растительных покровах и разделение опадающих и вечнозеленых растений. Изучение прибрежных вод океанов, морей, озер, так как световые волны этой длины проходят в глубь воды.	-
2	0.52-0.60	30	Оценка отражательной способности растений в зеленом диапазоне. Определение жизнеспособности растений (пик излучения, отраженного зеленью, около 0,55 мкм.)	№1 (0.52-0.60) 15метров
3	0.63-0.69	30	Оценка поглощательной способности хлорофилла для определения вида посадок. Смещение этой полосы по спектру может быть использовано для определения видового состава растений.	№2 (0.63-0.69) 15метров
4	0.76 - 0.90	30	Оценка отражательной способности растений в ближнем ИК -диапазоне для определения количества биомассы. Определение состава биомассы в прибрежных водах и конфигурации береговой линии водоемов.	3N(0.78-0.86) 15метров
5	1.55-1.75	30	Определение влажности растительности и различие снежного и облачного покровов. Определение содержания воды в растениях и почвах. Оптимален при геологическом картировании, определении запасов минерального сырья и при мониторинге окружающей среды, так как волны длиной 1,6 мкм наиболее сильно отражаются от большинства горных пород.	№4 (1.6-1.7) 30x30метров
6	10.4-12.5	60	Температурное картирование. Разделение почв по влажности.	№10(8.125-8.475) №11(8.475-8.825) №12(8.925-9.275) № 13(10.25-10.95) №14(10.95-11.65) 90x90метров
7	2.08-2.32	30	Оценка влажности растений и содержания окиси водорода в почве. Распознавание горных пород по их спектральным характеристикам 2,0-2,5 мкм содержит очень узкие характерные полосы поглощения, которые важны при определении минералов групп слоистых силикатов и карбонатов.	№5(2.145-2.185) №6(2.185-2.225) № 7(2.235-2.285) № 8(2.295-2.365) № 9(2.360-2.430) 30x30метров

Принципиально новые возможности дает применение радарных систем, работающих в микроволновом диапазоне электромагнитного излучения. Система радарного бокового обзора, установленная на спутнике, посылает сфокусированной антенной узконаправленный высокочастотный импульсный пучок электромагнитных волн к поверхности Земли. Отразившись от нее, он вновь принимается той же или другой, антенной и регистрируется на борту носителя приемной аппаратурой в виде изображения, так называемого радарного снимка. Радарные системы бокового обзора освещают электромагнитным пучком полосу по одну или обе стороны от линии полета спутника.

Такие съемки можно проводить в любое время суток, при любых погодных условиях и облачности, так как поток электромагнитного излучения в определенном диапазоне длин волн, направляемый антенной, беспрепятственно проходят сквозь облака, дождь, туман. Получаемые таким образом радарные изображения местности создают несколько преувеличенное представление контрастности рельефа снимаемого участка, что в ряде случаев способствует более четкому дешифрированию тектонических структур и различий в ландшафте.

Большое значение в современных условиях сильного антропогенного воздействия на внешнюю среду имеет экологический мониторинг. Успешное проведение мониторинга должно позволить прогнозировать изменение характеристик отдельных звеньев экологической системы и на основании этого предсказать дальнейшую эволюцию экосистемы во времени. Принципиальное значение в этом отношении имеет получение экспресс - информации состояния клеток организмов в результате различных внешних воздействий. Имеется в виду информация, которая позволила бы уже на ранних этапах диагностировать изменение клеточного метаболизма под влиянием внешних факторов. Принципиально важно получить эту информацию задолго до того, как результат внешних воздействий на организмы проявится в видимых признаках, таких, как изменение формы и задержка роста клеток, уменьшение численности клеточной популяции и общей биомассы. Конечно, эти признаки также важны для характеристики состояния, как отдельных звеньев, так и экосистемы в целом. Однако на основании их изменения можно констатировать лишь конечный эффект оказанного воздействия, результат того, что уже произошло. Такие признаки могут служить источником информации для ранней диагностики нарушения состояния клетки при внешних воздействиях. Отвечающие этим требованиям современные биофизические методы экспресс - диагностики состояния клеток основаны на регистрации начальных нарушений клеточного метаболизма в основном на мембранном уровне организации клетки.

Наибольшее развитие в последние годы получили различные спектральные и люминесцентные методы, которые используются главным образом для диагностики состояния клеток микроводорослей под влиянием факторов среды в водных экосистемах. В природных водоемах различные антропогенные загрязнения могут оказать существенное угнетающее влияние на фотосинтетический аппарат водорослей, что в итоге уменьшает продуктивность всей водной экологической системы. Регистрация действия внешних факторов на состояние фотосинтетических мембран клеток микроводорослей позволяет тем самым следить и за состоянием водной среды. Основная идея такого подхода состоит в том, что хлорофилл, находящийся в фотосинтетических мембранах, служит своего рода природным датчиком состояния клеток водорослей и высших растений. При нарушении состояния фотосинтетических мембран под действием внешнего фактора происходят определенные изменения оптических свойств хлорофилла, которые и служат источником информации для экспресс-диагностики состояния клеток. Этому обстоятельству способствует то, что в фотосинтетическом аппарате фотосистема II, ответственная за разложение воды и выделение кислорода, является чувствительной мишенью для таких внешних факторов, как экстремальные температуры, избыточная освещенность, соли тяжелых металлов, высушивание, повышение содержания солей в питательной среде.

Не вдаваясь детально в механизмы фотосинтеза, покажем научные основы и применения в природных условиях люминесцентных методов диагностики состояния клеток микроводорослей. Отметим вначале, что спектральные методы в экологических исследованиях применяются уже давно. Известно, например, что по изменению оптических свойств растительного покрова путем их регистрации с помощью

искусственных спутников Земли можно судить о состоянии растительных массивов. Например, продолжительные воздействия недостатка влаги, засухи, засоленность почв приводят к характерным изменениям спектров поглощения хлорофилла листового покрова и позволяют сделать вывод о неблагоприятном состоянии растений. Однако эти эффекты наблюдаются через значительные промежутки времени, когда нарушения состояния растений уже произошли и стали, как правило, необратимыми. В отличие от этого предлагаемые люминесцентные методы отражают такие изменения в фотосинтетическом аппарате, которые происходят на самых начальных этапах внешнего воздействия.

Дело в том, что первичные стадии фотосинтеза водорослей при действии факторов внешней среды не остаются неизменными, а активно регулируются клеткой в соответствии с ее физиологическим состоянием [1-4]. Характер изменения первичных стадий фотосинтеза непосредственно отражается в изменении флуоресценции хлорофилла в фотосинтетических мембранах клеток. Для понимания этой взаимосвязи достаточно напомнить, что поглощение кванта света переводит молекулу хлорофилла в электронное возбужденное состояние, энергия которого в растворе при отсутствии фотосинтеза переходит либо в тепло, либо в флуоресценцию. В фотосинтетической мембране энергия электронного возбуждения хлорофилла используется в реакционных центрах (РЦ) для генерации потока электронов в первичных стадиях фотосинтеза, необходимых для восстановления НАДФ и образования АТФ. Напомним, что первичные процессы фотосинтеза высших растений осуществляются при участии двух фотосистем, функционирующих последовательно. Фотосистема II разлагает воду с выделением свободного кислорода и отдает электрон через цепь переносчиков на фотосистему I, которая уже восстанавливает НАДФ [1-4]. В клетке в основном флуоресцирует хлорофилл, принадлежащий фотосистеме II, и именно изменения его флуоресценции говорят о состоянии реакционных центров этой фотосистемы. При активном фотосинтезе, когда все РЦ находятся в открытом рабочем состоянии, в условиях слабого освещения почти вся поглощенная энергия света используется в процессе фотосинтеза.

В этих условиях поглощенная энергия света уже не может использоваться в фотосинтезе, поэтому и флуоресценция хлорофилла возрастает. Можно найти разницу между интенсивностями флуоресценции хлорофилла при закрытых и открытых РЦ ( $F_v = F_m - F_0$ ), которую называют переменной флуоресценцией ( $F_v$ ) хлорофилла в клетках (рис. 1). Как видно, величина  $F_v$  соответствует той части энергии света, которая используется открытыми реакционными центрами в фотосинтезе, то есть может характеризовать активность начальных стадий фотосинтеза. На практике оценивают отношение  $F_v / F_m$ , величина которого тесно связана с первичной продуктивностью фитопланктона в природных водоемах.

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 отраженный подповерхностный свет используется для картирования концентрации хлорофилла из космоса.

Скорость света в воде эквивалентна скорости света в вакууме поделённой на коэффициент рефракции ( $n$ ), который обычно составляет  $n=1.33$ . Отсюда скорость света в воде приблизительно  $2.25 \cdot 10^8$  м/с. Так как скорость света в воде меньше чем в воздухе, часть его отражается от поверхности моря. Для света падающего под прямым углом к поверхности моря отражательная способность составляет  $(n-1)^2 / (n+1)^2$ , то есть  $0,02=2\%$ . Таким образом большинство солнечного света достигающего поверхности воды проходит вглубь, и лишь малая часть его отражается назад в атмосферу.

Уровень, на котором солнечный свет слабеет, разграничивает глубину, на которой он поглощается и глубину, нагреваемую солнцем. Ослабление происходит благодаря поглощению пигментами и рассеиванию молекулами и частицами. Ослабление зависит от длины волны. Голубой/фиолетовый цвет поглощается в наименьшей степени, тогда как красный в более сильной. Ослабление на единицу расстояния пропорционально излучению и облученности света

$$\frac{dI}{dx} = -cI \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние вдоль луча,  $c$ - коэффициент ослабления и  $I$  – излучение.

Излучение – энергия на единицу площади на пространственный угол. Она используется для описания энергии в потоке света проходящего с определённого направления. Если коэффициент поглощения постоянен, интенсивность света экспоненциально уменьшается с расстоянием.

$$I_2 = I_1 \exp(-cx) \quad (2)$$

где  $I_1$  – первоначальное излучение или облучённость света,  $I_2$  – радиация или иррадиация света после поглощения.

Хлорофилл в фитопланктоне поглощает свет, а сами растения рассеивают свет. И для наблюдателя вместе эти процессы изменяют цвет воды. Очень продуктивные воды, с большой концентрацией фитопланктона, имеют голубовато-зелёный или зелёный цвет. В безоблачную погоду цвет воды в озере можно наблюдать из космоса /5/. Это позволяет сканерам цвета океана, таким как Sea Wi FS, картировать распределение фитопланктона на больших пространствах.

При увеличении концентрации фитопланктона, глубина на которой солнечный свет полностью поглощается уменьшается. Глубина до которой солнечный свет нагревает воду зависит от продуктивности вод. Это усложняет расчёт солнечного прогрева перемешанного слоя.

Чем ближе вода к берегу тем она менее прозрачна. Воды находящиеся у самого побережья относятся к типу 1–9 показанному на рис.2.

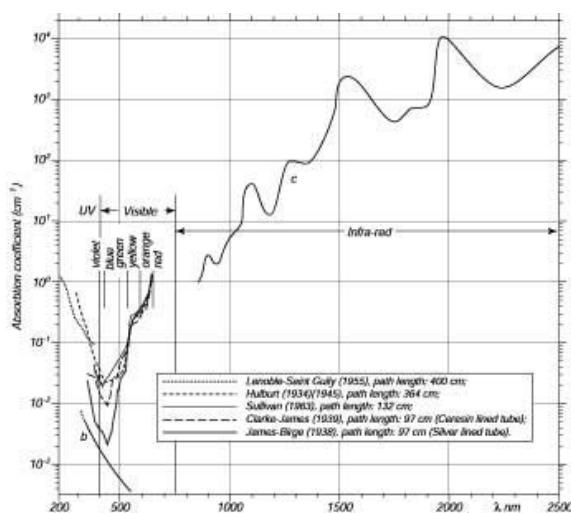


Рис.2. Коэффициент ослабления  $c$  и коэффициент рассеивания  $b$  для чистой воды как функция длины волны  $\lambda$  излучения



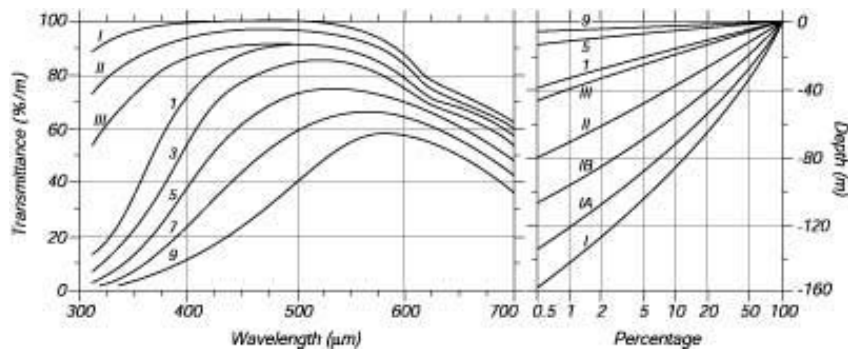


Рис.3. Слева: ослабление дневного света в % на метр как функция длины волны I: очень чистый океан; II: мутные тропические и субтропические воды; III: среднеширотные воды; 1–9: прибрежные воды увеличивающейся замутнённости. Угол падения для первых трёх случаев 90° для остальных случаев 45°. Справа: Количество света с длиной волны 465 нм достигающего определённой индикаторной глубины в тех же типах воды.

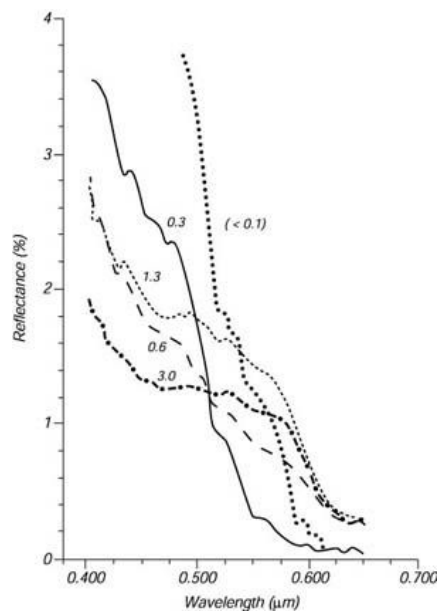


Рис.4. Спектральная отражательная способность озерной воды полученная в результате пролёта самолёта на высоте 305 м над водами с разной цветностью. Численные значения – среднее содержание хлорофилла в фотической зоне в мг/м<sup>3</sup>. Отражательная способность дана для вертикально поляризованного света наблюдаемого под углом Брюстера – 53°. Этот угол минимизирует отраженный от поверхности свет и выделяет свет из под поверхности слоев.

Цвет океана, следовательно, концентрация хлорофилла в верхних слоях океана, была измерена с помощью Coastal Zone Color Scanner carried, прибора на спутнике Nimbus-7, измеряет восходящее излучение в восьми каналах между 412 нм и 856 нм /5/. Большинство наблюдаемого спутником восходящего излучения приходит из атмосферы. Только около 10% приходит от поверхности моря. И молекулы воздуха и аэрозоли рассеивают свет; и для устранения влияния атмосферы была разработана очень точная техника.

Полное излучение  $L_t$ , принимаемое прибором представляет собой:

$$L_t(\lambda) = t(\lambda)LW(\lambda) + L_r(\lambda) + L_a(\lambda) \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения в канале измеренная инструментом,  $LW$  – излучение покинувшее поверхность воды,  $L_r$  – излучение рассеянное молекулами, называемое ещё Релевской радиацией,  $L_a$  – излучение рассеянное аэрозолями, и  $t$  – коэффициент

прозрачности атмосферы.  $L_g$  – может быть теоретически рассчитано, а  $L_a$  может быть посчитано исходя из количества красного света принятого инструментом, потому что очень мало красного света отражается от поверхности воды. Следовательно,  $LW$  может быть посчитано их излучения измеряемого спутником. Концентрация хлорофилла в столбе воды рассчитывается исходя из соотношения  $LW$  в двух частотных каналах. Используя данные с Coastal Zone Color Scanner:

$$C_{13} = 1.1298 \left[ \frac{LW(443)}{LW(550)} \right]^{-1.71} \quad (4)$$

$$C_{23} = 3.3266 \left[ \frac{LW(520)}{LW(550)} \right]^{-2.40} \quad (5)$$

где  $C$  – концентрация хлорофилла в поверхностных слоях в мг пигмента/м<sup>3</sup>, а  $LW(443)$ ,  $LW(520)$ , и  $LW(550)$  излучение на длинах волн 443, 520, и 550 нм.  $C_{13}$  используется когда  $C_{13} > 1.5$  мг/м<sup>3</sup>; в других случаях используют  $C_{23}$ . Такой способ позволяет рассчитывать концентрацию хлорофилла с точностью 50% в широком диапазоне от 0,01 до 10 мг/м<sup>3</sup>. Входными параметрами для модели являются вертикальный профиль хлорофилла  $Chl\_a(z)$  [мг м<sup>-3</sup>], спектр падающей рассеянной освещенности, поглощенной в воде [мЕ м<sup>-2</sup>], и температура воды  $T$  [°C]. Для представления поля подводной освещенности используется представление спектра коэффициента ослабления рассеянной падающей освещенности  $K_d(\lambda)$  и его составляющей  $K_{pl}(\lambda)$ , связанной с ослаблением света клетками фитопланктона [м<sup>-1</sup>] в зависимости от концентрации хлорофилла  $Chl\_a$  в следующем виде:

$$\begin{aligned} K_d(\lambda) &= K_w(\lambda) + Chl\_a \cdot a_1(\lambda) \exp[-b_1(\lambda)Chl\_a] + K_{di}(\lambda) + \Delta K(\lambda), \\ K_{pl}(\lambda) &= Chl\_a \cdot a_2(\lambda) \exp[-b_2(\lambda)Chl\_a] + K_{ci}(\lambda) + \Delta K(\lambda). \end{aligned} \quad (6)$$

Параметры  $a_1(\lambda)$ ,  $a_2(\lambda)$ ,  $b_1(\lambda)$ ,  $b_2(\lambda)$ ,  $K_{di}(\lambda)$ ,  $K_{ci}(\lambda)$ , а также коэффициент ослабления чистой воды находят по результатам измерений.

Спектр падающей рассеянной освещенности радиации в диапазоне ФАР на глубине  $z$  можно вычислить, используя известный спектр ослабления на каждой глубине и величину освещенности на поверхности по формуле:

$$E_{PAR}(\lambda, z) = E_{PAR}(\lambda, 0) \exp \left[ - \int_0^z K_d(\lambda, z') dz' \right], \quad (7)$$

а энергию, поглощенную фитопланктоном, по формуле:

$$\eta_{PAR}(z) \approx 1.2 \int_{400}^{700} E_{PAR}(\lambda, z) K_{pl}(\lambda, z) d\lambda. \quad (8)$$

Зависимость квантового выхода фотосинтеза  $\Phi$  от падающей подводной освещенности в диапазоне ФАР  $E_{\text{ФАР}}(z)$ , концентрации хлорофилла на поверхности и температуры слоя описывается соотношениями (приведены в общем виде):

$$\Phi(z) = \Phi_{\text{max}} \frac{E_{\text{ФАР}}^*}{E_{\text{ФАР}}^* + E_{\text{ФАР}}(z)}, \quad \Phi_{\text{max}} = \Phi_{\text{MAX}}(T) \frac{\text{Chl}_a^n(0)}{m + \text{Chl}_a^n(0)},$$

$$\Phi_{\text{MAX}}(T) = p Q_e^{T/A},$$

(9)

где  $m, n, p, q$  - параметры,  $E_{\text{ФАР}}^* = 6.4 \cdot 10^{19}$  [квант  $\text{м}^{-1} \text{с}^{-1}$ ],  $Q_e = 1.77$ .

Озеро Иссык-Куль в Иссык-кульской котловине в Северном Тянь-Шане между  $76^{\circ}05'$  и  $79^{\circ}12'$  восточной долготы и  $41^{\circ}51'$  и  $42^{\circ}56'$  северной широты. Уровень озера лежит на высоте 1606,9 м над уровнем моря. Длина озера – 178 км, максимальная ширина 60,1 км, площадь 6236 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 668 м, средняя глубина – 278,4 м (6), объем воды – 1738 км<sup>3</sup>. Озеро вытянуто в широтном направлении и со всех сторон окружено высокими горными хребтами: с юга Терской Ала-Тоо (максимальная высота 5280 м, средняя – 4290 м), с севера – Кунгей Ала-Тоо (максимальная высота 4770 м, средняя – 4200 м).

Озеро незамерзающее, температура верхних слоев воды в январе –  $4-6^{\circ}$ , феврале –  $3-5^{\circ}$ , в марте –  $4-5^{\circ}$ , в апреле –  $7,5-8,5^{\circ}$ , в мае –  $9-11^{\circ}$ , в июне –  $14-17^{\circ}$ , в июле –  $18-22^{\circ}$  (до  $24^{\circ}$ ), в августе  $17-19^{\circ}$ , в сентябре –  $13-15^{\circ}$ , октябре –  $11-13^{\circ}$ , ноябре –  $7-9^{\circ}$ , декабре –  $6-8^{\circ}$  (3). На глубине 25 метров в августе температура воды в центральной (наиболее глубокой части озера) около  $+8$ , ближе к побережью –  $12-14^{\circ}$ . На глубинах выше 500 метров температура воды круглый год держится в пределах  $3,6-4,2^{\circ}\text{C}$ .

Прозрачность в центральной части озера зимой в среднем 24-25 м, летом 14-16 м; в прибрежной зоне соответственно 11-18 м и 3-8 м. Максимальная прозрачность воды до 40-45 метров отмечается зимой в центре озера. В заливах и мелководьях она уменьшается за счет фито- и зоопланктона и минеральных частиц, особенно в устьях крупных рек до 0,5-1 метр.

Над Иссык-Кулем проносятся сильные ветры: восточный “Санташ” и западный “Улан”, скорость последнего иногда может достигать 35-40 м/сек. В году 56 дней приходится на ветры со скоростью свыше 15 м/сек. Сильные ветры вызывают на озере волны высотой до 3-4 метров.

Вода Иссык-Куля слабосоленая, общая минерализация воды около 5,97 мг/л, что в 5,5 раза меньше солености морской воды. В зоне впадения крупных рек минерализация воды снижается до 2-2,5 мг/л. Иссык-Куль имеет хлоридно-сульфатно-натриево-магниевый тип минерализации: содержание  $\text{Cl}$  0,63-1,60 г/л,  $\text{Ca}$  – 0,08-0,12 г/л,  $\text{N} (+\text{K})$  – 0,65-1,54 г/л,  $\text{Mg}$  – 0,11-0,29 г/л,  $\text{SO}_4^-$  – 0,83-2,10 г/л (3,4,6). Несмотря на большие глубины минерализация воды по вертикали и горизонтали весьма неоднородна, что объясняется водными течениями и хорошей перемешиваемостью водной массы.

Вода Иссык-Куля обладает щелочной реакцией – pH – 8,0-8,6.

Содержание кислорода в верхних слоях воды 6-6,5 мл/л, на глубине 50 метров – до 7 мл/л, в спокойных затоках и заливах содержание кислорода может достигать 10-14 мл/л.

Биогенных элементов, необходимых для развития фитопланктона и водной растительности, в воде Иссык-Куля весьма мало. Больше их содержится в поверхностных водах заливов и затонов: фосфора до 2-5 мг/м<sup>3</sup>, нитратов 0,5-1,6 мг/м<sup>3</sup>, аммонийного азота – 4,8-7,8 мг/м<sup>3</sup>. Содержание микроэлементов в воде мг/л: Fe-11,00; Br-1,74; J-0,04; Mo-0,05; Ag-0,002; Cu-0,0023; Zn-0,0475; Ni-0,001 (3,6). В связи с недостатком биогенных элементов фитопланктон озера Иссык-Куль развит значительно слабее, чем к примеру в таких крупных озерах как Ладожское, Онежское, Байкал, Балхаш и др.

Лучшего развития фитопланктон достигает в мелководных, особенно опресненных заливах (Тюпском, Каракольском, Покровском, Рыбачинском).

В составе фитопланктона озера обнаружено более 100 видов водорослей (табл.1) среди которых наибольшее видовое разнообразие приходится на группу сине-зеленых (Cyanophyta), диатомовых (Bacillariophyta) и зеленых (Chlorophyta) водорослей. Из сине-зеленых массовыми видами являются *Merismopedia punctata* Megeen, *M.tenuissima* Lemm., *Yloecapsa varia* (A.Br.) Hollerb., *Y. Minor* (Kütz.) Hollerb., *Microcystis pulverea* (Wood.) Forti. и др.(табл1), из диатомовых *Cyclotella meneghiniana* Kütz., *C. caspia* Yun., *C. ocellata* Pant. и др., из зеленых преобладают представители протококковых водорослей (*Oocystis issykkulica* Kulumb, *O. Borgei* Snow., *O. Pelgica* Lemm., *O. Solitaria* wittarock, *O. Parva* W.et.W., *Dictiosphaerium pulchellum* Wood. var *pulchellum* и др., табл.1). Эти группы водорослей составляют свыше 95% видового состава и биомасса фитопланктона. По количеству видов и биомассе основная часть фитопланктона в озере Иссык-Куль сосредоточена в верхнем слое воды 0-50 метров, а наибольшая концентрация отмечается на глубине около 25 метров (7,8). До глубин 100-120 м численность и биомасса фитопланктона сильно уменьшается, а глубже идет резкое снижение его концентрации, хотя живой планктон регистрируется до максимальных глубин(7,8). На больших глубинах 300-600 м регистрируется в основном *Yloecapsa minor* и *Lyngbya contorta*. Наличие фитопланктона на больших глубинах связано вероятнее всего с активной циркуляцией водных масс Иссык-Куля.

В сезонной динамике численности и биомассы фитопланктона просматриваются большие колебания, как по годам так по месяцам и сезонам, причем данные разных авторов значительно отличаются. Минимальное количество фитопланктона (20-136 кл/л в слое воды до 50 м) отмечается в январе-феврале, затем (в марте-апреле) заметно повышается (до 200-650 кл/л) и достигает максимума в мае-июне до 455-3150 кл/л (табл.2). В июле-августе, несмотря на благоприятный температурный режим численность фитопланктона заметно снижается, что связано, видимо, с выеданием его активно развивающимся зоопланктоном и зообентосом. В сентябре-октябре численность фитопланктона заметно снижается (примерно в 2 раза), однако держится еще на этом уровне вплоть до декабря.

Несмотря на сравнительно высокую численность фитопланктона, биомасса его относительно невелика, что объясняется мелкими размерами водорослей. Наибольшая биомасса фитопланктона в слое воды до 50 м отмечается в январе-феврале (16-33 мг/м<sup>3</sup>) и наибольшая в мае-июне (273-284 мг/м<sup>3</sup>), затем идет ее снижение (табл.2).

Таким образом в составе и распространении фитопланктона в пелагиали озера Иссык-Куль проявляются следующие закономерности.

По количеству видов преобладают: сине-зеленые водоросли (Cyanophyta)- 20 видов; диатомовые (Bacillariophyta)- 43 вида и зеленые (Chlorophyta)- 38 видов. Из других отделов имеются представители пиропитовых водорослей (Pyrrophyta)- 5 видов; золотистых (Chrysophyta)- 1 вид и желто-зеленых (Xanthophyta)- 1 вид.

Наибольшая численность и биомасса фитопланктона сосредоточена в верхнем 50-метровом слое воды с максимальной концентрацией его на глубине около 25 м. На глубинах 50-150 м численность фитопланктона резко снижается, а на больших глубинах 300-600 м он встречается крайне редко.

В мелководных заливах и прибрежной зоне озера численность фитопланктона может быть в несколько раз выше, чем в открытой части озера.

Продуктивность фитопланктона невысока, что объясняется мелкими размерами водорослей. Среднегодовая продуктивность в верхнем 50 метровом слое составляет 111-114 мг/м<sup>3</sup>, максимальная (в мае-июне) - 230-280 мг/м<sup>3</sup> (7,8).

В сезонной динамике численность фитопланктона наименьшая в январе-феврале (20-130 кл/л) и наибольшая в мае-июне (400-3000 кл/л). В зимний период, по сравнению с

летним, содержание фитопланктона в верхнем 50 метровом слое воды снижается в 25-35 раз.

Для исследования флуоресценции фитопланктона в природных водоемах на кафедре биофизики биологического факультета МГУ разработан специальный прибор (погружной зонд-флуориметр), позволяющий проводить измерение величин  $F_0$  и  $F_m$  в водоемах на разных глубинах (до 200 м). Впервые в 2001 году было исследована температура воды, подводная освещенность, концентрация и фотохимическая активность фитопланктона методом pump and probe использовали погружной импульсный флуориметр в юго-восточной районе озера Иссык-Куль [3]. Принцип действия зонда представлен на схеме (рис. 2). При освещении первой слабой вспышкой света порции фитопланктона в зонде измеряется величина фоновой флуоресценции  $F_0$ . Затем при действии второй мощной вспышки света в клетках происходит кратковременное насыщение всех РЦ, которые не успевают утилизировать поглощенную энергию света и переходят в результате этого в закрытое состояние. В этих условиях флуоресценция хлорофилла возрастает до максимальных значений  $F_m$ . Таким образом можно определить значения переменной флуоресценции  $F_v = F_m - F_0$  и отношение  $F_v / F_m$ , которые отражают эффективность запасаения энергии света на начальных этапах фотосинтеза.

Поскольку величина  $F_0$  зависит от количества хлорофилла в клетках, то это можно использовать для определения его концентрации. По величине  $F_0$  можно также определять и количество биомассы фитопланктона, которое пропорционально содержанию хлорофилла в клетках. Определение величин  $F_0$  и  $F_v / F_m$  позволяет выявить ситуации, когда в водоемах имеется много фитопланктона ( $F_0$  велико), однако его активность и продукция невелика из-за неблагоприятных условий. На основании этих данных можно получить сравнительную информацию о распределении как самого фитопланктона ( $F_0$ ), так и его фотосинтетической активности ( $F_v / F_m$ ) по глубине и горизонтальным разрезам в водоемах и рассчитать фотосинтетическую продукцию. На рис. 2 приведен профиль распределения фитопланктона и его активности по глубине. Другим источником информации о характере функционирования фотосинтетического аппарата является процесс замедленной флуоресценции (ЗФ), обнаруженный Арноном и Стреллером в 1951 году. Это явление состоит в том, что после светового возбуждения в фотосинтезирующих клетках наблюдается слабое, длительно затухающее свечение, испускаемое хлорофиллом. Это свечение возникает уже после прекращения флуоресценции ( $F_0$ ) за счет энергии, выделяемой в ходе темновых реакций первичных фотопродуктов фотосинтеза в РЦ (рис.4).

Наряду с общей универсальностью организации пигмент - белковых комплексов фотосинтезирующих организмов существует и определенная специфичность: наиболее переменным по количественному и качественному составу пигментов является свето-собирающий комплекс (ССК). У зеленых и эвгленовых водорослей ССК включает основное количество хлорофилла **b**, коротковолновые формы хлорофилла **a** и каротиноиды; у диатомовых — хлорофилл-**a/c** белковый комплекс, водорастворимый фукоксантин; у сине-зеленых — фикобилипротеины (фикоэритрин, фикоцианин, аллофикоцианин). В пределах каждой группы качественный состав пигментов генетически детерминирован, а количественное соотношение зависит от условий роста и развития водорослей (световой режим, содержание биогенных веществ и т. п.). В связи с этим существуют и специфические для основных таксонов водорослей различия в фотохимических процессах и транспорте энергии.

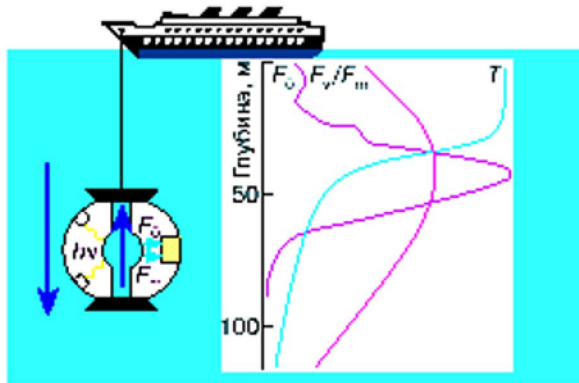
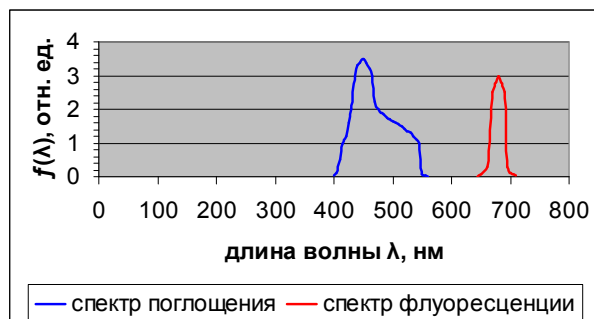
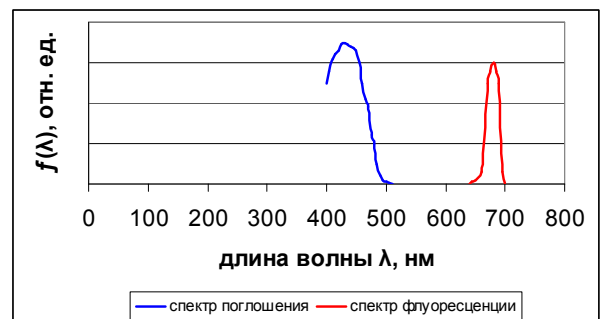


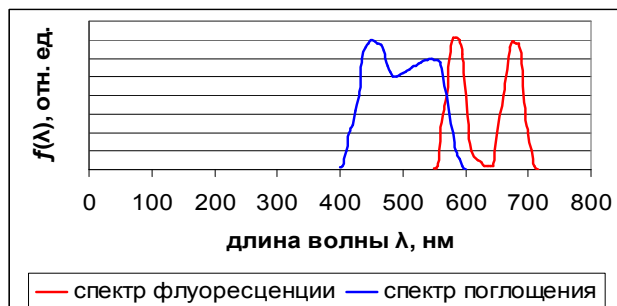
Рис. 6. Схема морского зондирования фитопланктона с использованием погружного двухимпульсного флуориметра. Справа показаны результаты изменения на разной глубине количества ( $F_0$ ), фотосинтетической активности ( $F_v / F_m$ ) и температуры ( $T$ ) водной среды. Видно, что наибольшее количество и активность клеток наблюдаются на глубине 50 м. В поверхностных слоях фотосинтез угнетается из-за слишком больших интенсивностей солнечного света.



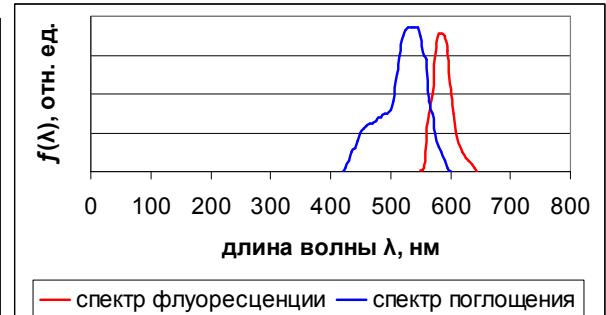
а) Зеленые



б) Диатомовые



в) Красные



г) Сине-зеленые

Рис.7. Особенности пигментного аппарата и динамика фитопланктона

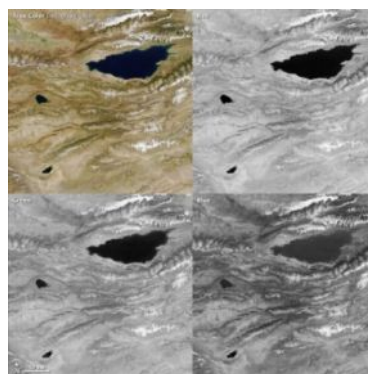


Рис.8. Спутниковые снимки Иссык Кульского региона в нескольких диапазонах:Красный,Зеленый, Синий.

Состав, обилие и распространение фитопланктона по акватории озера обусловлены неодинаковыми метеорологическими, гидрологическими условиями и антропогенным воздействием.

Перемешивание водных масс и повышенная плотность воды весной обеспечивают интенсивное развитие водорослей в толще воды. С повышением температуры начинают вегетацию водоросли других отделов, которые образуют в верхних слоях воды повышенные концентрации; диатомеи скапливаются в придонных горизонтах. Вынос фитопланктона из зоны фотосинтеза снижает интенсивность его развития (рис.4.).

С глубиной уменьшается проникновение длинноволнового света, происходит развитие комплементарной пигментной адаптации в разных условиях освещенности. Это определяется изменениями в синтезе пигментов. Сезонная динамика хлорофилла **с** совпадает с динамикой хлорофилла **а**. Максимумы наблюдаются в конце апреля и в конце августа. Отношение Хл **с**/ Хл **а**, по мнению многих исследователей, является показателем физиологического состояния водорослей, увеличиваясь в “стареющем” планктоне и детритном материале. Увеличение отношения связано с тем, что хлорофилл **а** разлагается быстрее, чем хлорофилл **с**. Отношение Хл **с**/ Хл **а** было наименьшим во время весеннего максимума хлорофилла **а**, а наибольшим - в январе-марте, когда световые условия наиболее неблагоприятны. По-видимому, это отношение действительно дает представление о физиологическом состоянии водорослей, так как при массовых вспышках их развития оно снижается, а в периоды между вспышками, когда часть водорослей уже отмерла, - повышается. Таким образом, на формирование альгоценоза оказывают влияние многие факторы - сезонные изменения температуры и освещенности, глубина обитания, гидрологический режим и связанные с ним миграции водорослей, как вертикальные, так и по акватории водохранилища, а также влияние антропогенных факторов [4].

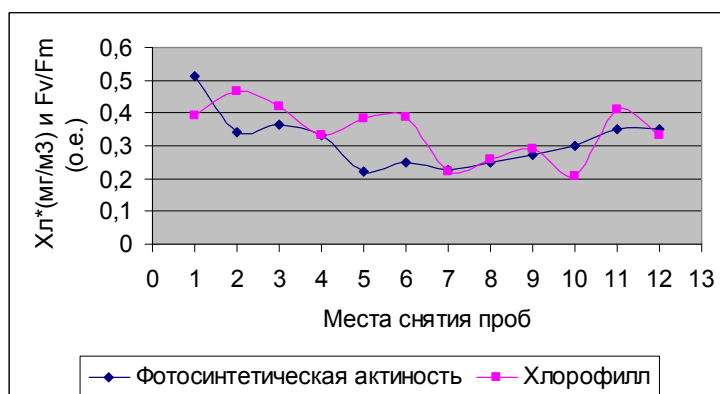


Рис.8. Горизонтальное распределение параметров флуоресценции Fo(Хл\*) и Fv/Fm

Обилие фитопланктона выражали в единицах концентрации хлорофилла (Хл\*), предварительно откалибровав в лабораторных условиях выход сигнала Fo по концентрации хлорофилла **а**, а также проведены анализы горизонтального распределения параметров флуоресценции фитопланктона в верхнем перемешиваемом слое оз. Иссык-Куль на глубине до 10 метров (средняя температура - 17,93 °С) (рис.5.) и в заливах [1-4].

Концентрации неорганического азота и фосфатов вдоль побережья Каракол-Тамга оз. Иссык-Куль (рис.6.).

При исследовании распределения флуоресценции по акватории озера Иссык-Куль наглядно прослеживалась связь между параметрами флуоресценции фитопланктона и концентрацией биогенов. Построенные карты горизонтального распределения значений Fo(Хл\*), Fv/Fm 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

приходилось 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 получается связь между содержанием минеральных веществ и интенсивностью флуоресценции фитопланктона. На рис. 9-15. показаны результаты экспериментальных измерений параметров водной среды озера Иссык-Куль[6].

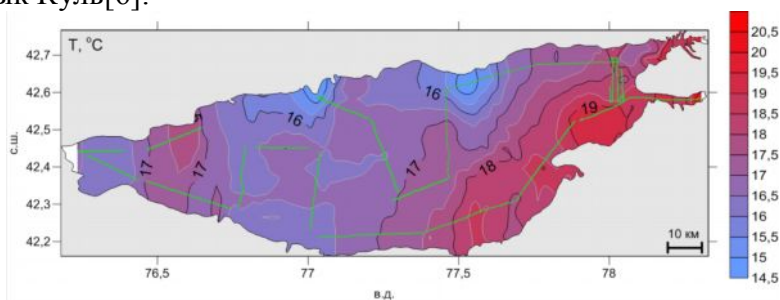


Рис.9. Распределение температуры в поверхностном слое озера Иссык-Куль по данным измерений проточной системы. Зеленым цветом показан путь следования судна.

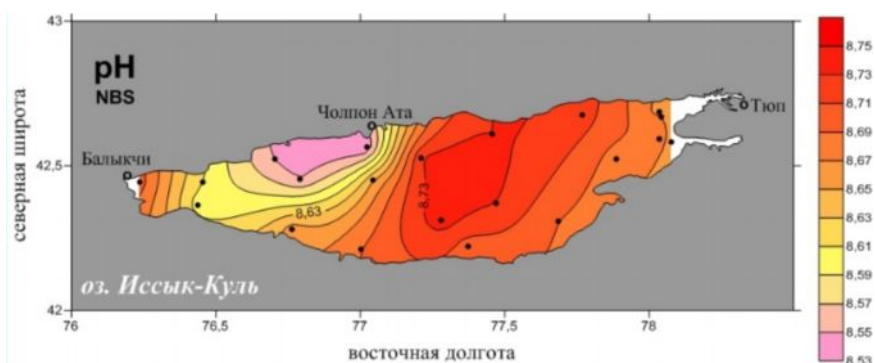


Рис. 10. Распределение величины pH (NBS) в поверхностных вод озера результатам съемки 23 – 27 июня 2015 г.

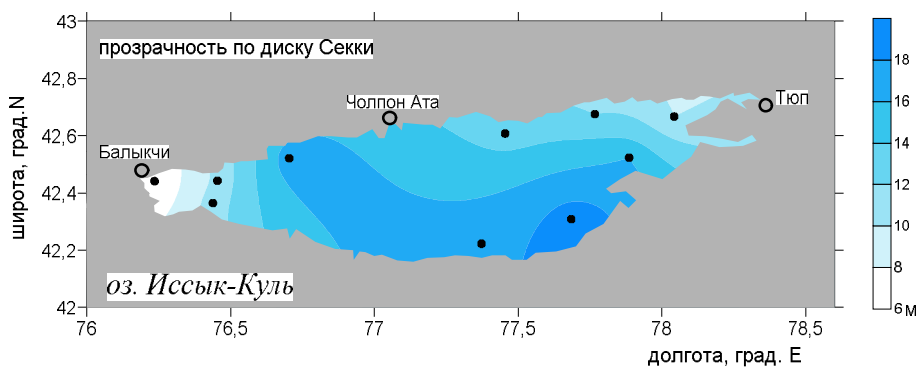


Рис. 11. Распределение относительной прозрачности (максимальной глубины видимости диска Секки) – Н (в м).



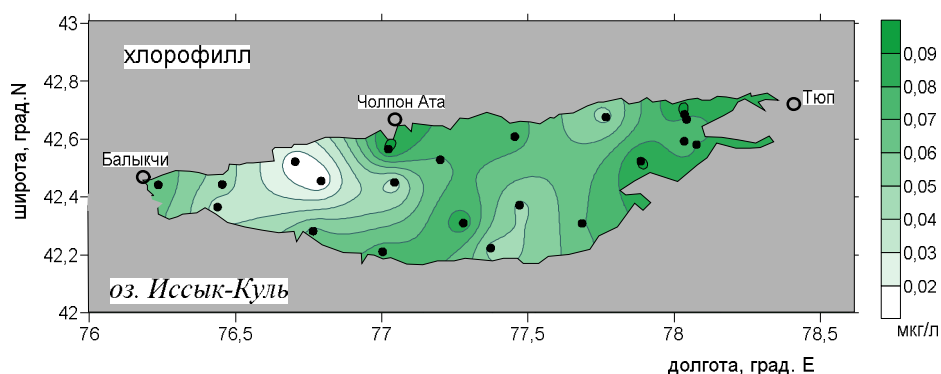


Рис. 12. Распределение концентраций взвешенного органического вещества (Свов, мг/л) на поверхности озера.

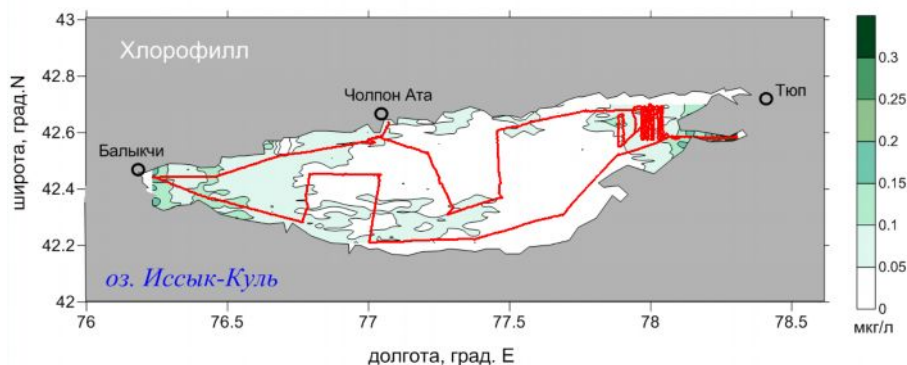


Рис. 13. Площадное распределение хлорофилла в поверхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., полученное флуоресцентным лидаром УФЛ-9.

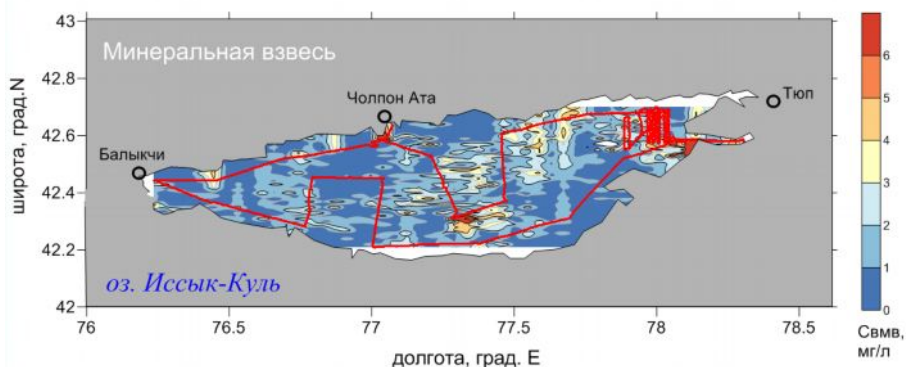


Рис. 14. Площадное распределение взвешенного органического вещества в поверхностном слое оз. Иссык-Куль, 23-26 июня 2015 г., полученное флуоресцентным лидаром УФЛ-9 [6].

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, оптимальные условия для роста и развития фитопланктона были на глубине 25-55 м. Клетки фитопланктона в поверхностных слоях имеют высокую чувствительность к появлению биогенов. Высокое количество и активность реакционных центров фотосинтеза была найдена в районах, где происходит принос с речной водой терригенных частиц. Фитопланктон может служить индикатором чистоты воды в озере Иссык-Куля.

### Список литературы

1. Тыныбеков А.К. Экспериментальное измерение фитопланктона оз. Иссык-Куль [Текст] / А.К.Тыныбеков. - Известия КГТУ. – 2006. - №9. - с. 89-93.
2. Тыныбеков А.К. Использование погружного зонда флуориметра при определении фитопланктона озера Иссык-Куль [Текст] / А.К. Тыныбеков, Д.Н. Маторин. - Вестник КРСУ. - 2007. - Том 7. №6. - с. 127-132.
3. Тыныбеков А.К. Состояние фитопланктона озера Иссык Куль [Текст] / А.К.Тыныбеков. – Вестник КРСУ. - 2009. - 229с.
4. Тыныбеков А.К. Исследование природного фитопланктона на озере Иссык-Куль с использованием погружного флуориметра [Текст] / А.К. Тыныбеков, Д.Н. Маторин. - Вестник Московского Государственного Университета. – 2002. - №1,- изд.№16, биология. - с.22-23.
5. *Левин В.А.* Разработка технологий спутникового мониторинга окружающей среды по данным метеорологических спутников [Текст] / В.А.Левин и др // Открытое образование. - 2010. - № 5. - с.41-49.
6. Grant RNF 14-50-00095 (P. O. Zavyalov's section), International expedition "Issyk Kul 2014 - 2015", Institute of oceanology of P.P. Shirshov of the Russian Academy of Sciences (IO Russian Academy of Sciences), Institute of physics and technology problems and materials science NAN KR.