

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

Допущена к защите
Зав. кафедрой к.ф.-м.н., доцент
Т.Р. Еремина
10.06.2016

Кафедра промысловой океанологии и
охраны природных вод

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**
**Пространственно-временная изменчивость
биооптических характеристик в восточной
части Финского залива**

Выполнил(а)	А.К. Иванова, гр. О-437
Руководитель	к.ф.-м.н, доцент Т.Р. Еремина

Санкт-Петербург 2016

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(РГГМУ)

Допущена к защите
Зав. кафедрой к.ф.-м.н., доцент
_____ Т.Р. Еремина
____.06.2016

Кафедра промышленной океанологии и
охраны природных вод

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**
**Пространственно-временная изменчивость
биооптических характеристик в восточной
части Финского залива**

Выполнил(а) А.К. Иванова,
гр. О-437
Руководитель к.ф.-м.н., доцент
Т.Р. Еремина

Санкт-Петербург 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Сокращения	3
Введение	4
1 Балтийское море и Финский залив	5
1.1 Физико-географическое описание района	5
1.2 Описание температурных условий	6
1.3 Химико-биологические условия восточной части Финского залива	10
2 Мониторинг биооптических характеристик вод восточной части Финского залива	17
2.1 Экологическое состояние Финского залива	17
2.2 Теоретические основы биооптического мониторинга	18
2.3 Параметризация: моделирование и оценка	20
2.4 Методы исследования	21
3 Анализ пространственно-временной изменчивости биооптических характеристик	24
3.1 Выбор района исследований и исходных данных	24
3.2 Анализ пространственно-временной изменчивости прозрачности и флюоресценции	27
Заключение	41
Список использованных источников	42
Приложения	44

СОКРАЩЕНИЯ

ЛАЭС	– Ленинградская атомная электростанция
ХЭЛКОМ	– Хельсинкская комиссия
ВООС	– Baltic Operational Oceanographic System
НОАА	– National Oceanic and Atmospheric Administration
ТПМ	– Температура поверхности моря

ВВЕДЕНИЕ

Финский залив с давних времен играет важную роль в развитии северо-западного региона Российской Федерации. На его берегах расположено множество природных и исторических достопримечательностей, они густо заселены; существует множество промышленных комплексов, а в водах активно развит рыбный промысел.

Благодаря географическому положению, Финский залив обладает рядом особенностей. А именно: низкая соленость и ограниченный водообмен с открытой частью Балтийского моря, значительное влияние метеорологических факторов на гидрологические характеристики. Вследствие антропогенного воздействия в воды залива поступает большое количество биогенов, которое влияет на экологическое состояние вод Финского залива.

Целью данной работы является изучение пространственно-временной изменчивости биооптических характеристик восточной части Финского залива.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать методы биооптического мониторинга водной среды;
2. Провести статистический анализ значений прозрачности и флюоресценции хлорофилла *in vivo*;
3. Провести параметризацию вертикальных профилей флюоресценции хлорофилла *in vivo*;
4. Провести анализ пространственно-временной изменчивости биооптических характеристик в водах восточной части Финского залива;

Балтийское море и Финский залив

1.1 Физико-географическое описание района

Балтийское море, благодаря его замкнутой системе, можно отнести к внутреннему типу морей. Проливами, которые называются Датскими, Балтика сообщается с Северным морем. В последствии Датские проливы сообщаются с проливами Скагеррак и Каттегат [1]. Глубины Балтийского моря, в среднем, составляют 54 метра, что говорит о расположении на материковой отмели. 459 метров составляет максимально зарегистрированная глубина, располагающаяся в Ландсорской котловине. Проливы мелководные, их глубина 7 – 35 метров, что говорит о незначительным водообмене с Северным морем [2]. Почти все дно покрыто песками и илом. Площадь Балтийского моря около 419 тыс.км², объем равен 21,5 тыс.км³. Около 400 км составляет длина залива. Площадь поверхности воды 29 700 км², а объем водной массы – 1 120 км³, максимальная глубина 115 м и средняя – 38 м. [2]

Финский залив располагается в восточной части Балтийского моря. С запада на восток, по линии мыса Пысаспеа, расположенного на западе полуострова Ханко вплоть до устья реки Невы.

Северному берегу Финского залива свойственно преобладание кристаллических пород. Его окружают гранитные островами, покрытыми скалами, именуемые шхерами. Между островами узкие проливы. Юго-восточный берег песчаный и низкий. Берег южный менее изрезан. У его берегов располагаются: Копорская губа, Нарвский залив, Лужская губа. Восток Финского залива именуется Невской губой, а севернее располагается Выборгский залив, в который впадают реки Нева, Луга, Нарва. [3]

Самая полноводная река, которая впадает в Финский залив – это Нева, определяющая его гидрологический режим. Ее общий вклад составляет 70%.

Суммарный приток воды составляет 109 км^3 в год, объем бассейна – 421 тыс. км^2 .

К востоку от о. Гогланд расположена восточная часть Финского залива. Площадь поверхности воды этой части залива $12\,500 \text{ км}^2$, а объем – 276 км^3 . Самый глубоководный район располагается около о. Гогланд, где глубины составляют 65 м , а восточнее него, в сторону устья Невы, идет спад глубин. [4]

В Балтийское море впадает около 250 рек. Каждый год, по многолетним данным, в море поступает до 433 км^3 воды, что составляет $2,1\%$ от общего объема. Река Нева приносит $83,5 \text{ км}^3$ в год. Устья балтийских рек расположены неравномерно и речной сток различен в зависимости от района.

1.2 Описание температурных условий

Балтийское море обладает достаточно низкой соленостью. Соленые воды движутся в направлении юг - северо-восток. Причиной тому служит циклоническая циркуляция. В целом, соленость Балтики увеличивается от поверхности до дна. Центральные и юго-западные районы показывают повышение солености до глубин $30\text{-}50 \text{ м}$, ниже располагается галоклин ($60\text{-}80 \text{ м}$), после которого опять идет увеличение. Для северо-востока свойственно постепенное возрастание до $70\text{-}80 \text{ м}$, ниже залегает галоклин. (Рисунок 1.1)

СОЛЕННОСТЬ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

Масштаб 1:15 000 000

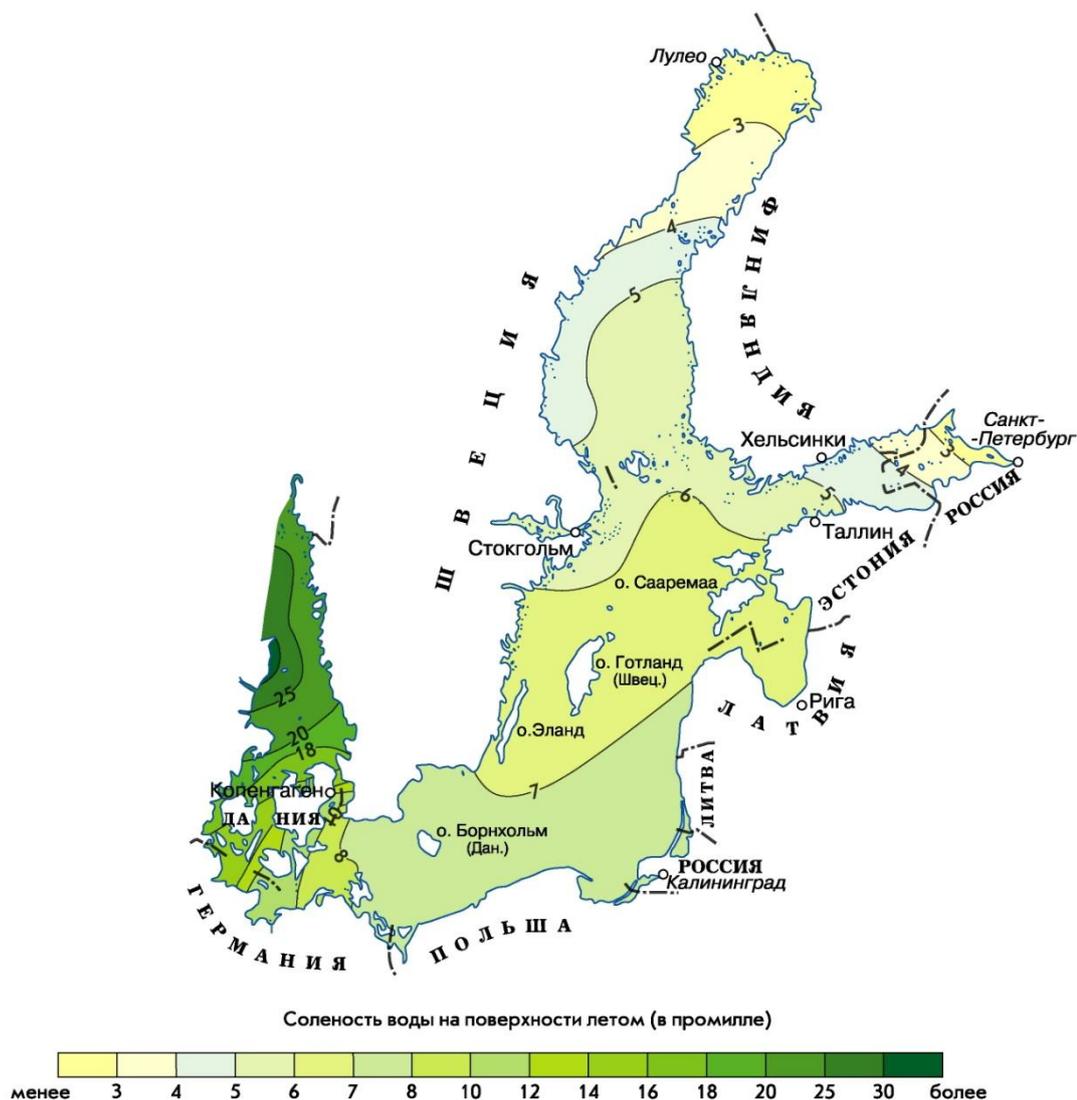


Рисунок 1.1 — Схема распределения солёности воды на поверхности Балтийского моря [1]

В условиях небольшой изменчивости солёности по глубине и пространству, именно температура определяет характер стратификации, которая определяет режим перемешивания и стратификацию Балтийских вод в целом, и Финского залива в частности.

Балтийское море обладает существенной протяженностью с запада на восток и с севера на юг. По этой причине возникает разница в климатических условиях, совмещается умеренный и морской климат. Присутствуют и

некоторые черты климата континентального. Значительное влияние на метеорологические параметры оказывают Азорский и Сибирский антициклоны. А так же Исландский минимум. Сезонные отличия определяются характером их взаимодействия между собой. Например, благодаря взаимодействию Сибирского максимума и Исландского минимума, в холодный, осенний и зимний периоды дуют сильные западные ветра, приносящие с собой пасмурную погоду. [1]

В зимнее время средняя температура воздуха держится на отметке -3°C на севере и -5°C на востоке. Температура над поверхностью моря резко снижается до -30°C , а иногда и -35°C . В теплый период года с запада и северо-запад дуют умеренные ветра. Погода преимущественно прохладная и влажная. Жара наступает, когда с средиземноморского побережья приходят потоки прогретого воздуха. В самый жаркий месяц, июль, средняя температура воздуха около $16\text{--}18^{\circ}\text{C}$ во всех районах моря, кроме Ботнического залива, где она составляет $14\text{--}15^{\circ}\text{C}$.

Сильно влияют на градиенты температур гидрометеорологические условия. По всему Финскому заливу степень прогрева поверхности моря различна, что определяет разницу величин температуры воды и характер ее пространственного распределения. У поверхности прогрев воды происходит интенсивнее и изменение температуры имеет широкий диапазон. Немаловажное влияние оказывает сток речных вод и приток глубинных вод океана. Глубины значительнее 50 метров, удерживают температуру в пределах $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$ в южной части моря и нулевую в Ботническом заливе. (Рисунок 1.2)

ТЕМПЕРАТУРА ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ

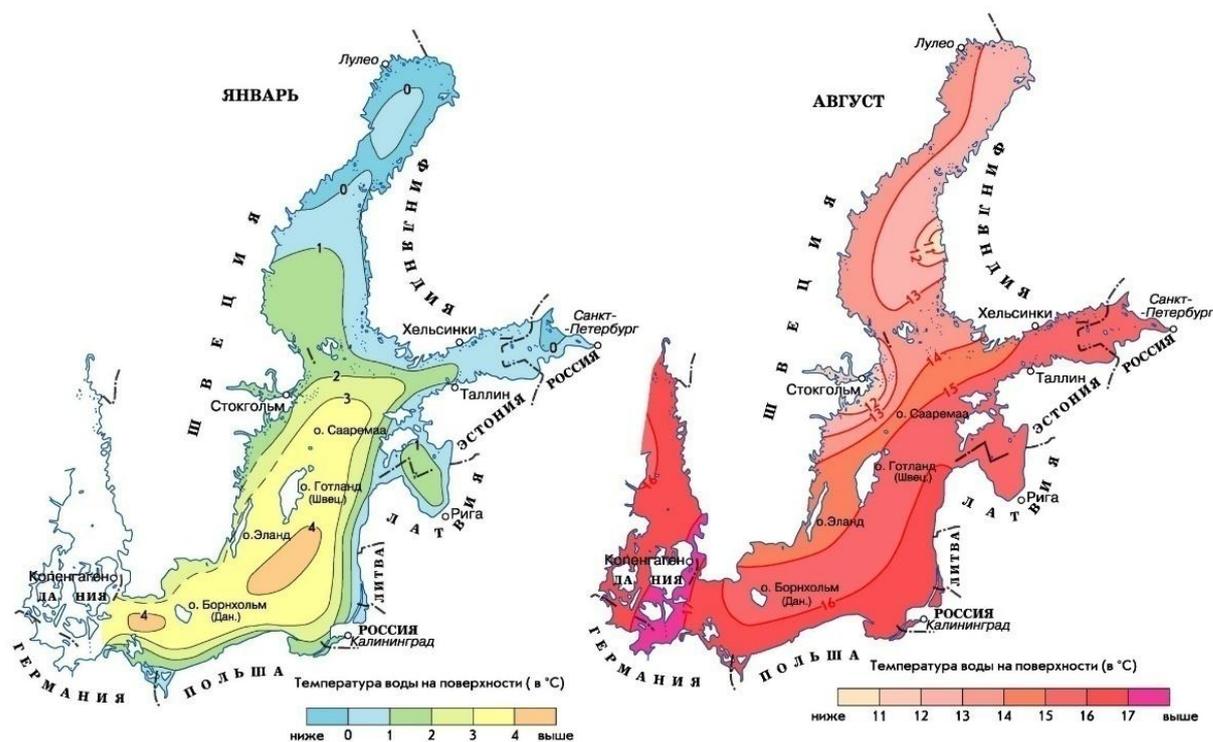


Рисунок 1.2 — Схема распределения температуры воды на поверхности Балтийского моря [1]

Балтийское море обладает двухслойной структурой. Изменение температуры в поверхностном слое имеет ежегодный цикл, вызванный радиационным балансом и взаимодействием океан-атмосфера, тогда как на нижний слой не влияют изменения в атмосфере. Его температура определяется адвекцией из Северного моря. Теплый сезонный подповерхностный слой развивается в течение лета вместе с сезонным термоклином в верхних слоях. В нижних слоях изменения незначительны. Наибольшие изменения наблюдаются на юге Балтики, где существенное влияние имеет адвекция, приходящая через Датский проливы из Северного моря. Когда водные массы перемещаются к северу, они тонут, вследствие их большей солёности, относительно окружающей воды. [5]

1.3 Химико-биологические условия восточной части Финского залива

Сообщество микроскопических растений, которые передвигаются в воде с помощью течений, именуется фитопланктоном. Пищей им служат биогенные вещества, это соединения азота, фосфора и кремния. И недостаток, и избыток этих веществ негативно влияет на фитопланктонное сообщество. При недостатке биогенных веществ, рост и развитие фитопланктона резко замедляются. Переизбыток приводит к эвтрофикации, а именно к чрезмерному развитию вида фитопланктона, такого как сине-зеленые водоросли. В этом случае кислород, немаловажный для иных форм жизни уходит на разложение данного вида. Остаточные продукты разложения покрывают значительные участки на побережье, что может значительно навредить морским экосистемам. [6].

Зеленые, сине-зеленые, диатомовые, пирофитовые, золотистые и эвгленовые водоросли относятся к пресноводным формам фитопланктона. Фитопланктонные сообщества развиваются определенным образом и зависят от множества факторов.

К примеру, до определенного момента времени прирост биомассы протекает пропорционально количеству поглощаемого света. В лабораторных условиях было выявлено, что зеленые и сине-зеленые водоросли интенсивнее всего размножаются при наличии круглосуточного освещения, а диатомовые, при более коротком фотопериоде. [7] Для них важна температура воды. Диатомовые предпочитают более низкие температуры и, как следствие, их развитие протекает в весенний и осенний период. Зеленые и сине-зеленые — более высокие.

На интенсивность развития фитопланктона влияет прозрачность водной среды. Финский залив достаточно мелководен и в результате взмучивания и ветрового перемешивания, прозрачность воды уменьшается. Особенно это свойственно прибрежным районам. Так же влияние на данный

фактор оказывают отмершие организмы, которые оседают и образуют взвеси. В период интенсивного цветения, прозрачность воды так же значительно уменьшается. [7]

В восточной части Финского залива, которая характеризуется пониженной соленостью, растет около 150 разных видов водорослей, среди которых преобладают диатомовые, сине-зеленые и зеленые водоросли. В летний период наиболее активны сине-зеленые водоросли. Их отличительная особенность в том, что они обладают специальными клетками, фиксирующими азот – гетероцистами. Этим объясняется их уникальное экологическое положение, а также делает сине-зеленые водоросли важнейшим участником биологического круговорота азота.

В Финском заливе среди всех водорослей этого типа следует выделить следующие: *Microcystis flos-aquae*, *Anabaena flos-aquae*, *Aphanizomenon flos-aquae*. Данные виды способны наращивать биомассу вместе, но, как правило, один из видов при наступлении для него благополучных условий существования начинает активно размножаться и достигает значительного количества и водоем «зацветает».

Microcystis flos-aquae встречается в Финском заливе, образуя колонии. Небольшие сферические клетки, которые формируют колонии различной формы, покрытые слизью желтого цвета. Наличие большого числа газовых вакуолей дает им возможность свободно перемещаться в водной толще. Колонии *Microcystis flos-aquae* достигают весьма внушительных размеров, таких, что их можно увидеть невооруженным глазом. Эти скопления напоминают хлопьевидную взвесь, грязновато-зеленоватого цвета, представленная на рисунке 1.3.

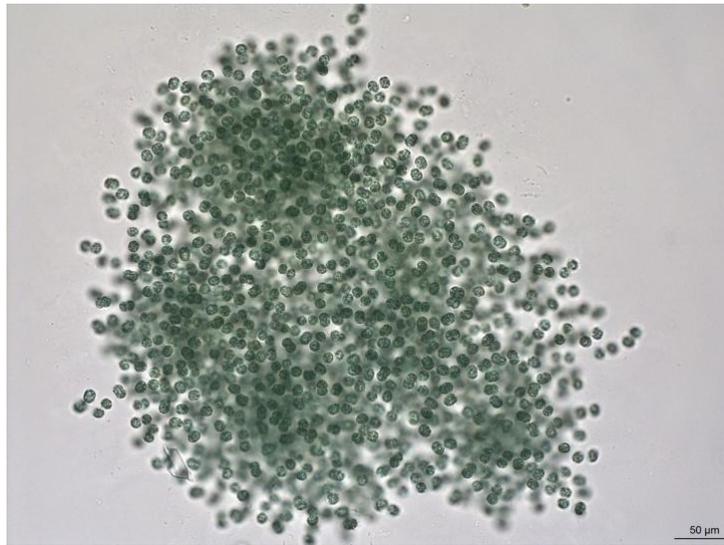


Рисунок 1.3 – Изображение колонии *Microcystis flos-aquae* [10]

Anabaena flos-aquae – состоит из вегетативных клеток с вакуолями из спор и гетероцист. Когда вода «зацветает» *Anabaena flos-aquae* образует большие сгустки зеленых оттенков на поверхности водоема.

Водоросли *Anabaena*, представленные на рисунке 1.4, достаточно опасный представитель планктонного сообщества, так как помимо того, что вызывают цветение воды, они имеют особенность синтезировать и накапливать в себе различные ядовитые вещества, (изначальное строение ядовитое), а также они обладают уникальной способностью фиксировать в своих клетках атмосферный азот.



Рисунок 1.4 – *Anabaena flos-aquae* [10]

Aphanizomenon flos-aquae – обладает насыщенным сине-зеленым цветом. Водоросли состоят из нитей, образующих пучки (рисунок 1.5). Нити, состоящие из коротких цилиндрических клеточек с газовыми вакуолями. Их удобно рассматривать под микроскопом. Клетки бесцветны и имеют удлиненную форму. Встречаются довольно крупные споры и гетероцисты среди вегетативных клеток.

По оценкам ряда китайских ученых *Aphanizomenon flos-aquae* растет независимо от температурных условий, но самый интенсивный рост происходит в температурном диапазоне от 20°C до 25°C. [10]



Рисунок – 1.5 *Aphanizomenon flos-aquae* [10]

Диатомовые водоросли цветут первыми. В зависимости от вида, их температурный оптимум составляет примерно от 5 до 12°C. Сине-зеленые водоросли доминируют в летний сезон. Их значимость в природе очень важна. По причине того, что это самая многочисленная группа в составе планктона, они производят до 25% органического вещества Земли, представляя собой важное звено в пищевой цепи водных существ. [11] Среди диатомовых водорослей в Финском заливе преобладают четыре вида.

Asterionella formosa – наиболее занимательная из них. Ее клетки в форме палочек создают скопления, напоминающие по своей форме звезды представленные на рисунке 1.6. Клетки находятся в одной плоскости и соединены концами расширенных уголков с помощью уплотнений, покрытых слизью. Уплотнения обладают непрочной структурой, и *Asterionella formosa* при небольшом давлении распадается на отдельные клетки. В зависимости от освещенности, температурный оптимум для *asterionella formosa* меняется. Чем меньше освещенность, тем более благоприятная требуется температура. Так, при наличии большой

освещенности *asterionella formosa* может расти при 11°C, а при малой ей нужна водная среда с температурой не более 5°C. [11]

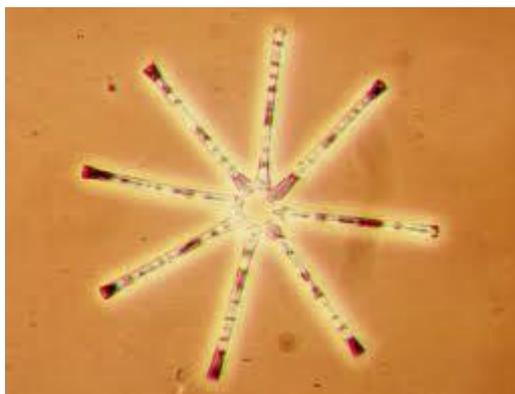


Рисунок 1.6– *Asterionella Formosa* [11]

Иной вид диатомовых водорослей, не менее распространенный в водах Финского залива – *melosira islandica* (рисунок 1.7). Клетки напоминают маленькие цилиндры, образуют нитчатые прямые колонии склеивая поверхность соседних клеток специальной слизью. Температурный оптимум для данного вида составляет около 10°C.



Рисунок 1.7. – *Melisora Islandica* [11]

Значимую роль в процессе фотосинтеза играют хлорофиллы или зеленые пигменты. На сегодняшний день известно около 10 видов хлорофиллов, которые различны по химическому составу, цвету и распространенности среди живых организмов. Хлорофилл имеет способность

к избирательному поглощению света. Для всех высших растений свойственно наличие хлорофилла, *a* и *b*.

Так же, хлорофилл обладает способностью к флуоресценции, которая представляет собой свечение тел, возбуждаемое освещением и продолжающееся очень короткий промежуток времени (10^{-8} - 10^{-9} с). Свет, испускаемый при флуоресценции, имеет всегда большую длину волны по сравнению с поглощенным, по причине того, что часть поглощенной энергии выделяется в виде тепла. По химическому строению хлорофиллы — сложные эфиры дикарбоновой органической кислоты — хлорофиллина и двух остатков спиртов — фитола и метилового. [8] Способность хлорофилла *in vivo* к флуоресценции позволяет исследовать закономерности распределения фитопланктона по значениям флуоресценции.

2. Мониторинг биологических характеристик вод восточной части Финского залива

2.1. Экологическое состояние Финского залива

В наше время, человек активно взаимодействует с природой, что приводит к ухудшению естественной среды обитания для морских и прибрежных обитателей. В северном регионе наиболее значимо на экосистему влияют сельскохозяйственные стоки биогенных элементов, которые вызывают эвтрофикацию залива. Негативное воздействие оказывает Ленинградская атомная электростанция (ЛАЭС) и водный, и автотранспорт. В особенности сильно на экологию Балтики оказывает влияние транспортировка нефтепродуктов. Активно создаются новые нефтепорты на берегах Финского залива, прокладываются новые судоходные пути. Существует риск аварий. Все эти факторы создают значимую нагрузку на морские экосистемы и прибрежные районы.

Мелкие организмы, такие как фитопланктон, сильно реагируют на изменчивость условий обитания. Жизнедеятельность фитопланктона Невской губы в значительной степени определяется биогенами, попадающими в залив с суши, а также световыми условиями, которые, в свою очередь, тесно связаны с прозрачностью воды.

В период интенсивного намыва "дамбы" прозрачность воды в Невской губе была крайне низка, что в свою очередь препятствовало "цветению" фитопланктона, несмотря на высокие концентрации биогенов и теплую погоду. В 1992 - 1993 годах землеройные работы фактически прекратились, что не замедлило сказаться на прозрачности воды. В начале лета 1993 года она составляла 1,5 - 2 м. Увеличение прозрачности и высокая концентрация биогенов чуть не привела к катастрофическим последствиям, но ситуацию

спасло то, что в результате общего экономического спада выброс азота и фосфора в Ладожское озеро и Неву сократился. [9]

Экологическое состояние Финского залива является определяющим для всей восточной части бассейна Балтийского моря и информация о нем, о методах его оценки имеет высокое значение для ученых всех стран данного региона.

2.2. Теоретические основы биооптического мониторинга

Частью экологического мониторинга является биоиндикация – фактическая оценка состояния окружающей среды по физическим и биологическим показателям. Целью биоиндикации является регулярная оценка качества окружающей среды. Для этого используются специально отобранные для этой цели живые организмы.

Характеристиками, подлежащими мониторингу, являются: атмосферный воздух; снежный покров; поверхностные воды и донные отложения водных объектов; подземные воды; почвенный покров; растительный покров; геологическая среда; наземные и водных экосистемы.

По содержанию в воде биогенов различают следующие трофические типы водоемов: олиготрофный (бедный биогенами), эвтрофный (богатый биогенами) и промежуточный мезотрофный. Трофность водоемов определяется биоиндикаторами. [12]

Изменения, связанные с эвтрофикацией, наблюдаются с помощью биологического и химического метода. Выявление начавшейся эвтрофикации возможно по изменению состава фитопланктона, такому как участившееся цветение вод. Для эвтрофированных вод свойственно низкое видовое разнообразие фитопланктона при высоком обилии нескольких кодоминантов.

Конвенция по защите морской среды района Балтийского моря была принята в 1974 году в Хельсинки. Создавалась комиссия по защите морской среды Балтийского моря - Хельсинская комиссия, которая проводит ежегодные сессии и разрабатывает рекомендации ХЭЛКОМ, согласно статьям Хельсинской Конвенции.

Деятельность Хельсинкской комиссии или ХЕЛКОМ направлена на защиту морской среды Балтийского моря от всех источников загрязнений и реализуется в рамках межправительственного сотрудничества Германии, Дании, Европейского сообщества, Латвии, Литвы, Польши, России, Финляндии, Швеции и Эстонии.

Существует так же система мониторинга BOOS, целью которой является: повышение безопасности и эффективности морского транспорта и морских операций; управление ресурсами Балтийского моря (рыболовство); смягчение последствий загрязнения; исследования изменчивости морского климата.

Спутниковый мониторинг имеет большое значение в современной системе наблюдений. Спутники серии NOAA используются для оперативного приема данных. На основе этих данных можно строить карты ТПМ, взвесей и концентрации хлорофилла, что позволяет выявить особенности структуры и динамику вод Балтики. Рассмотреть пространственное и временное распределение концентрации хлорофилла, его многолетнюю изменчивость возможно с помощью спутниковой системы Giovanni.

Для снятия натуральных данных по флюоресценции использовался флюориметр, то есть прибор измеряющий интенсивность люминисценции. Это изобретение относится к области спектрофлюорометрии. Может использоваться для измерения концентрации различных веществ. Существует способ для определения содержания хлорофилла в водной среде

с помощью флюориметра. Суть состоит в возбуждении флюоресценции в водной среде и последующего по ней определения.

В экспедиции использовался датчик WetLab Eco Flu. Серия ECO занимает лидирующие позиции при проведении биологического мониторинга. Флюоресценции хлорофилла *in vivo* является измеряемой данным прибором характеристикой.

In vivo флюоресценцию впервые было предложено использовать в качестве оценки содержания хлорофилла а в 1966 году. С тех пор данный подход получил широкое распространение, что связано с развитием автоматических измерительных комплексов, в том числе, совмещенных с гидрологическими измерениями. Таким образом, наблюдаемое быстрое накопление данных о флюоресценции, обладает значительным потенциалом для оценки концентрации хлорофилла а в водоемах, первичной продукции трофического статуса водоема и других биооптических характеристик. [13]

При снятии данных по прозрачности применялся классический полевой метод, с использованием диска Секки. Диск Секки представляет собой плоский белый диск диаметром 20-40 см. Его погружают на достаточную глубину, чтобы он полностью исчез из виду. Чтобы определить глубину точнее, записывается два отсчета. Первый показывает глубину исчезновения и второй глубину появления диска вновь. Эта глубина является показателем прозрачности в океанологии и гидрологии.

2.3. Параметризация: моделирование и оценка

Параметрическое моделирование — моделирование с использованием параметров элементов модели и соотношений между этими параметрами. Параметрическое моделирование проводится с 1989 года, с появлением систем автоматизированного проектирования, с возможностью параметризации. Суть процесса в создании математической модели с

заданными параметрами, которые отображают распределение интересующей характеристики.

И в настоящее время существуют процессы в океане, и в атмосфере, для детального изучения которых требуется большее количество данных. К примеру, жизнедеятельность фитопланктона - это основа функционирования водной экосистемы. Закономерности развития фитопланктона в морских экосистемах является предметом различных исследований. Получить достоверную и надежную информацию о фитопланктоне достаточно сложно из-за пространственной неоднородности и быстрой изменчивости состояния водной среды.

Спутниковая информация содержит данные о концентрации хлорофилла и его флуоресценции, мутности воды, освещенности, температуре, и ряде других характеристик поверхностного слоя океана. Но точность этой информации не так велика. Применение математических моделей дает возможность в полной мере использовать доступную информацию о фитопланктоне и изучить суть процесса, даже при недостаточном количестве данных. Параметризация позволяют определить содержание хлорофилла в толще воды, которое обеспечивает наблюдаемые концентрации на поверхности.

Немаловажно определение качества модели. Необходимо сравнение с натурными данными. В нашем случае, модель должна содержать в себе информацию о поверхностном значении, максимумах и минимумах содержания хлорофилла в воде; глубине залегания; градиенте.

2.4. Методы исследования

Для получения более детального представления об изменчивости биооптических характеристик необходимо привести профили к некоторому унифицированному виду. Для этой цели, например, подходит параметризация, предложенная в 1988 году Платтом и др в статье

«Phytoplankton and Thermal Structure in the Upper Ocean: Consequences of Nonuniformity in Chlorophyll Profile». [14] В те годы датчики не позволяли измерения максимального значения хлорофилла, и параметризация Платта предложила решение для восстановления вертикального распределения хлорофилла по 4 параметрам (B_0 , Z_{max} , h , σ). Matsumura и Shiomoto в 1993 [15] году улучшили модель. Вклад Matsumura в развитие модели вертикального распределения состоит в учете вертикального градиента концентрации хлорофилла (S), который выражен вторым слагаемым в формуле 3.1. Таким образом, расчетная формула выглядит следующим образом [15]:

$$\text{Chl}(z) = B_0 + S \times Z + \frac{h}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(Z-Z_{max})^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3.1)$$

где $Chl(z)$ является концентрацией хлорофилла (мг / м³) на глубине Z (м), B_0 - фоновая концентрация хлорофилла на поверхности моря (мг / м³), S это вертикальный градиент концентрации хлорофилла (мг/ м³/м), h – общий хлорофилл выше фона (мг/м²), σ - стандартное отклонение Гауссова распределения, контролирует толщину максимального хлорофилла в слое (м), а Z_{max} - глубина залегания максимума хлорофилла (м).

Согласно представлению Matsumura и Shiomoto идеальная модель распределения хлорофилла учитывает: общий градиент вертикального распределения, фоновую концентрацию хлорофилла, общее превышение хлорофилла над фоновым значением, стандартное отклонение. Зона максимального градиента располагается в поверхностном слое и выражена одним максимумом. Данная модель представлена на рисунке 2.1.

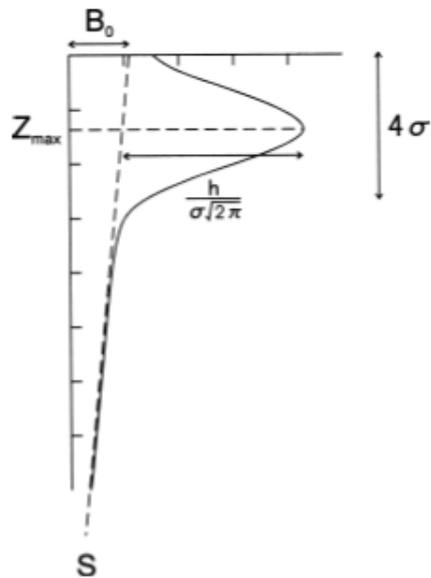


Рисунок 2.1. - Модель вертикального распределения хлорофилла, согласно Matsumura и Shiomoto [15]

Модель Платта применялась долгие годы для исследования различных бассейнов. Мильян-Нуньес использовал эту модель в Калифорнии, где она продемонстрировала свою полезность. [15]

Улучшенная модель Matsumura с успехом применялась для исследования профилей хлорофилла для водных бассейнов вокруг Японии. Кимура и Окада, в 1997 году использовали эту же модель для своих исследований в Южном океане и получили хорошие результаты. [15]

3. Анализ пространственно-временной изменчивости биооптических характеристик

3.1. Выбор района исследования и исходных данных

В качестве района исследования была выбрана восточная часть Финского залива. Для того, чтобы разработать вертикальную модель распределения хлорофилла, были выбраны профили флюоресценции, полученные в ходе проведения натурных наблюдений на 54 станциях. Эти профили были получены в ходе экспедиции РГГМУ за 2012 – 2013 годы. Экспедиция проходила в августе. Маршрут 2012 года представлен на рисунке 3.1, который был выполнен с помощью программы Google Earth. Маршрут 2013 года представлен на рисунке 3.2.

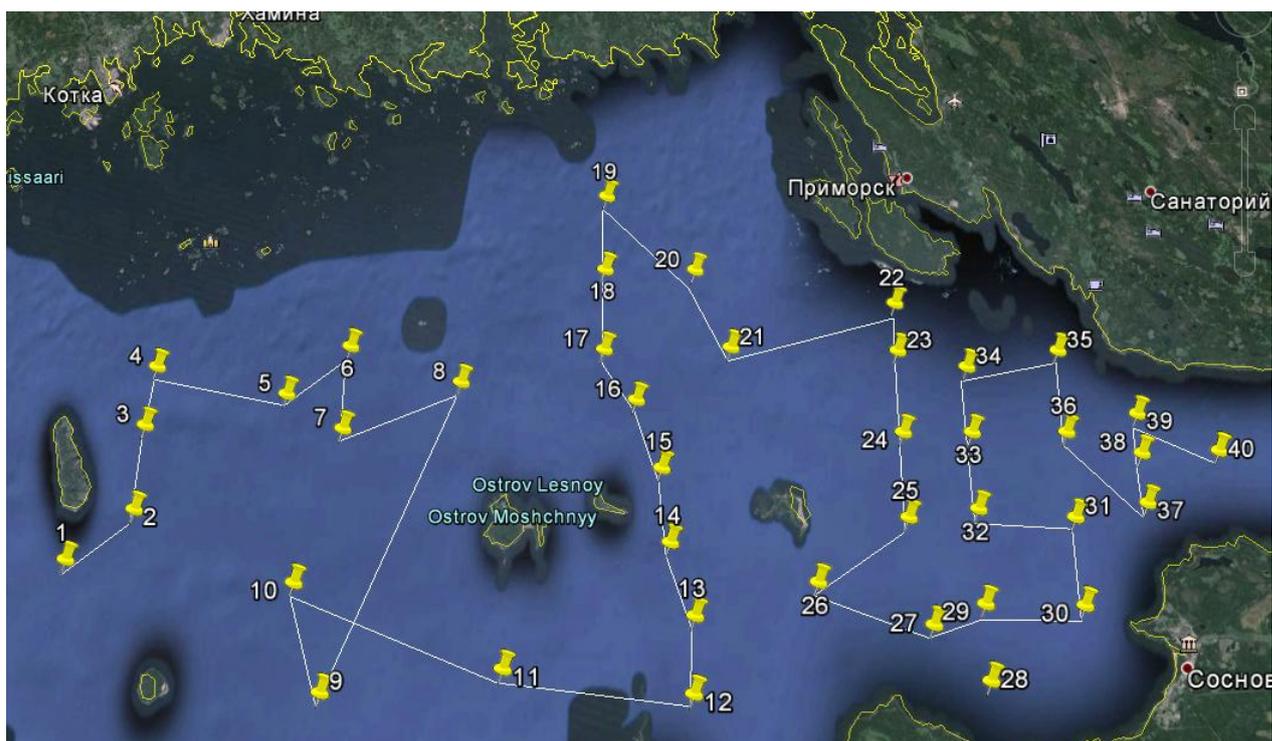


Рисунок 3.1. – Маршрут экспедиции РГГМУ, 2012 год



Рисунок 3.2. – Маршрут экспедиции РГГМУ, 2013 год

Станции располагались от 55° до 60° северной широты и от 27° до 29° восточной долготы (таблица 3.1; таблица 3.2). Экспедиционная работа включала в себя исследование гидрометеорологических, биологических, гидрологических и гидрохимических характеристик исследования моря. Полученные данные использовались в настоящей работе в целях параметризации и оценки пространственной и временной изменчивости биооптических характеристик.

Таблица 3.1. Координаты и номера станций (2012 год)

№ станции	Широта	Долгота	День	Время
1	59°57.038'N	027°00.047'E	21.07.2012	9:55
2	59°59.990'N	027°07.000'E	21.07.2012	13:07
3	60°04.984'N	027°06.857'E	21.07.2012	14:35
4	60°08.569'N	027°07.291'E	21.07.2012	16:50
5	60°07.011'N	027°23.001'E	26.07.2012	8:05
6	60°10.017'N	027°30.001'E	26.07.2012	10:15
7	60°04.969'N	027°29.940'E	26.07.2012	11:30
8	60°07.883'N	027°43.386'E	26.07.2012	13:55
9	59°50.018'N	027°30.023'E	26.07.2012	18:50
10	59°55.991'N	027°26.015'E	26.07.2012	20:30
11	59°51.420'N	027°49.750'E	26.07.2012	23:22
12	59°50.170'N	028°10.601'E	27.07.2012	3:15
13	59°54.406'N	028°10.766'E	27.06.2012	5:20
14	59°58.513'N	028°08.002'E	27.07.2012	7:05
15	60°02.820'N	028°07.015'E	27.07.2012	8:25
16	60°06.894'N	028°03.997'E	27.07.2012	10:15
17	60°09.990'N	028°00.140'E	27.07.2012	11:55
18	60°15.090'N	028°00.059'E	27.07.2012	13:10
19	60°19.949'N	028°00.078'E	27.07.2012	14:55
20	60°15.100'N	028°10.953'E	27.07.2012	17:20
21	60°10.170'N	028°15.159'E	27.07.2012	18:30
22	60°13.004'N	028°34.941'E	27.07.2012	20:55
23	60°09.996'N	028°34.949'E	27.07.2012	22:30
24	60°05.000'N	028°35.000'E	27.07.2012	23:52
25	59°59.990'N	028°35.050'E	28.07.2012	1:31
26	59°56.304'N	028°24.528'E	28.07.2012	3:35
27	59°53.953'N	028°37.120'E	28.07.2012	5:20
28	59°50.901'N	028°42.950'E	28.07.2012	6:20
29	59°55.101'N	028°43.004'E	28.07.2012	7:25
30	59°54.999'N	028°54.039'E	28.07.2012	9:55
31	59°59.990'N	028°54.000'E	28.07.2012	11:45
32	60°00.490'N	028°43.050'E	28.07.2012	12:57
33	60°05.001'N	028°43.002'E	28.07.2012	14:00
34	60°09.000'N	028°43.000'E	28.07.2012	15:36
35	60°09.995'N	028°53.978'E	28.07.2012	16:58
36	60°05.005'N	028°54.005'E	28.07.2012	18:00
37	60°00.798'N	029°02.437'E	28.07.2012	19:58
38	60°03.727'N	029°02.466'E	28.07.2012	20:35
39	60°06.092'N	029°02.495'E	28.07.2012	21:15
40	60°03.840'N	029°11.450'E	28.07.2012	22:40

Таблица 3.2. Координаты и номера станций (2013 год)

№	Широта	Долгота	Дата, MSK	Время, MSK
56	60°19.980'N	028°00.018'E	01.08.13	18:40
57	60°15.013'N	028°00.030'E	01.08.13	20:37
58	60°06.852'N	028°03.962'E	01.08.13	22:40
59	60°02.863'N	028°07.039'E	01.08.13	23:50
60	59°58.494'N	028°07.962'E	02.08.13	1:05
61	59°54.405'N	028°10.673'E	02.08.13	2:17
62	59°55.064'N	028°54.071'E	02.08.13	8:20
63	59°59.992'N	028°54.008'E	02.08.13	9:45
64	60°04.990'N	028°53.998'E	02.08.13	11:20
65	60°09.967'N	028°54.081'E	02.08.13	12:15
66	60°06.064'N	029°02.515'E	02.08.13	13:43
67	60°03.685'N	029°02.432'E	02.08.13	14:43
68	60°00.801'N	029°02.267'E	02.08.13	15:50
69	60°03.805'N	029°11.513'E	02.08.13	18:00

3.2. Анализ пространственно-временной изменчивости прозрачности и флюоресценции

Построение карт вертикального распределения изучаемых характеристик проводилась в программе Matlab (Приложение А). В ходе проведенного исследования было выявлено, что вертикальное распределение концентрации флюоресценции хлорофилла *in vivo* в восточной части Финского залива подразделяется на три типа. Тип А - максимальное значение флюоресценции находится в приповерхностном слое (рисунок 3.3; рисунок 3.4). Тип В - максимальное значение флюоресценции вблизи поверхности моря, на глубине 7 – 15 м (рисунок 3.5; рисунок 3.6) и тип С – характеризуется отсутствием значительных градиентов флюоресценции (рисунок 3.7; рисунок 3.8). В ходе исследования было обнаружено несколько ситуаций, в которых модель не адекватно отображала вертикальное распределение флюоресценции. Эти случаи были вынесены в отдельный тип и в данной работе не рассматривались. Тестирование качества параметризации при оценке вертикального распределения производилось с использованием данных, полученных в рейсах.

Так же, в ходе работы был проведен анализ статистических характеристик, которые представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. – Рассчитанные статистические характеристики для различных типов распределения

Характеристика	тип А	тип В	тип С	неудачные
Xmax	4,81	4,20	2,64	6,09
Xmin	0,75	0,61	0,92	0,62
σ	1,35	1,61	2,74	7,40
S	-0,02	-0,05	-0,05	-0,10
Y0	1,67	2,15	2,02	3,31

В качестве оценки статистических параметров были рассчитаны:

- 1) *среднее значение*

2) стандартное отклонение, которое характеризуют среднее рассеяние значений ряда от среднего арифметического значения.

3) X_{min} и X_{max} – максимальное и минимальное значение ряда.

4) S - вертикальный градиент концентрации хлорофилла

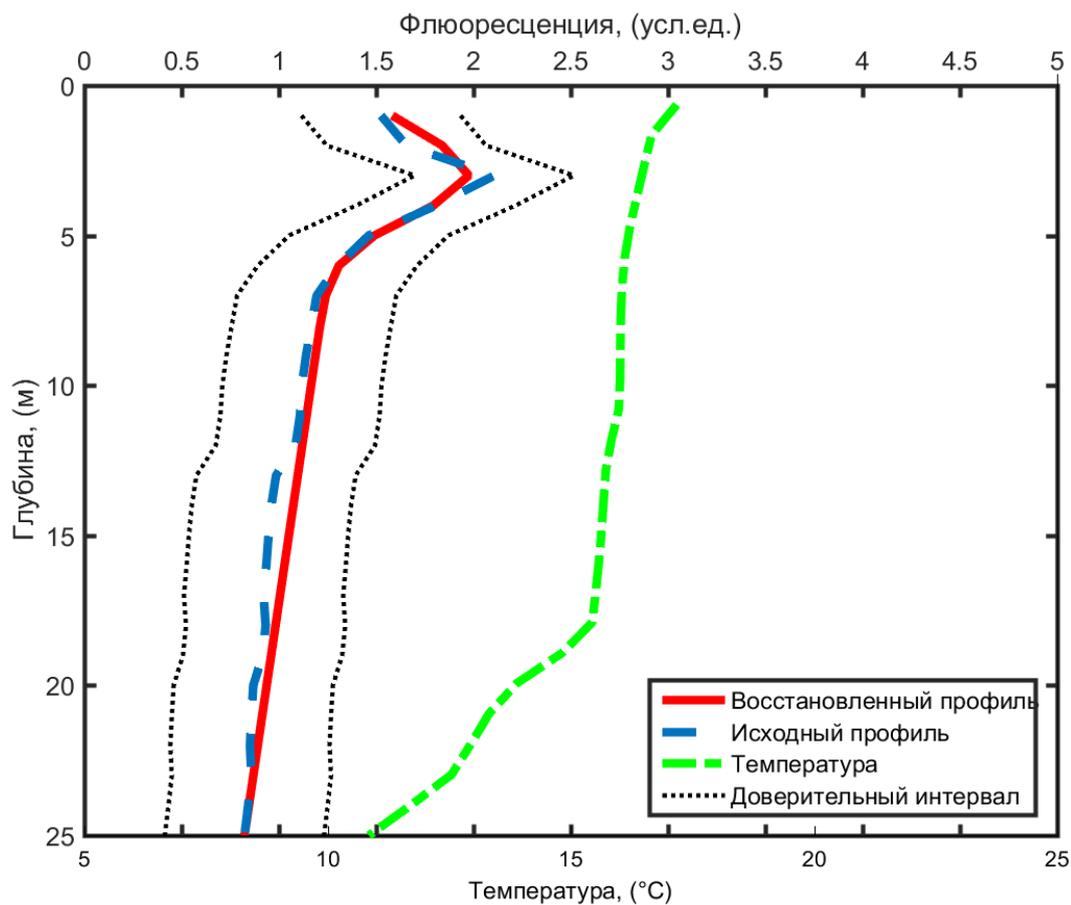


Рисунок 3.3. – вертикальное распределение изучаемых характеристик на станции 8 за 2012 год, Тип А по уравнению Matsumura и Shiomoto

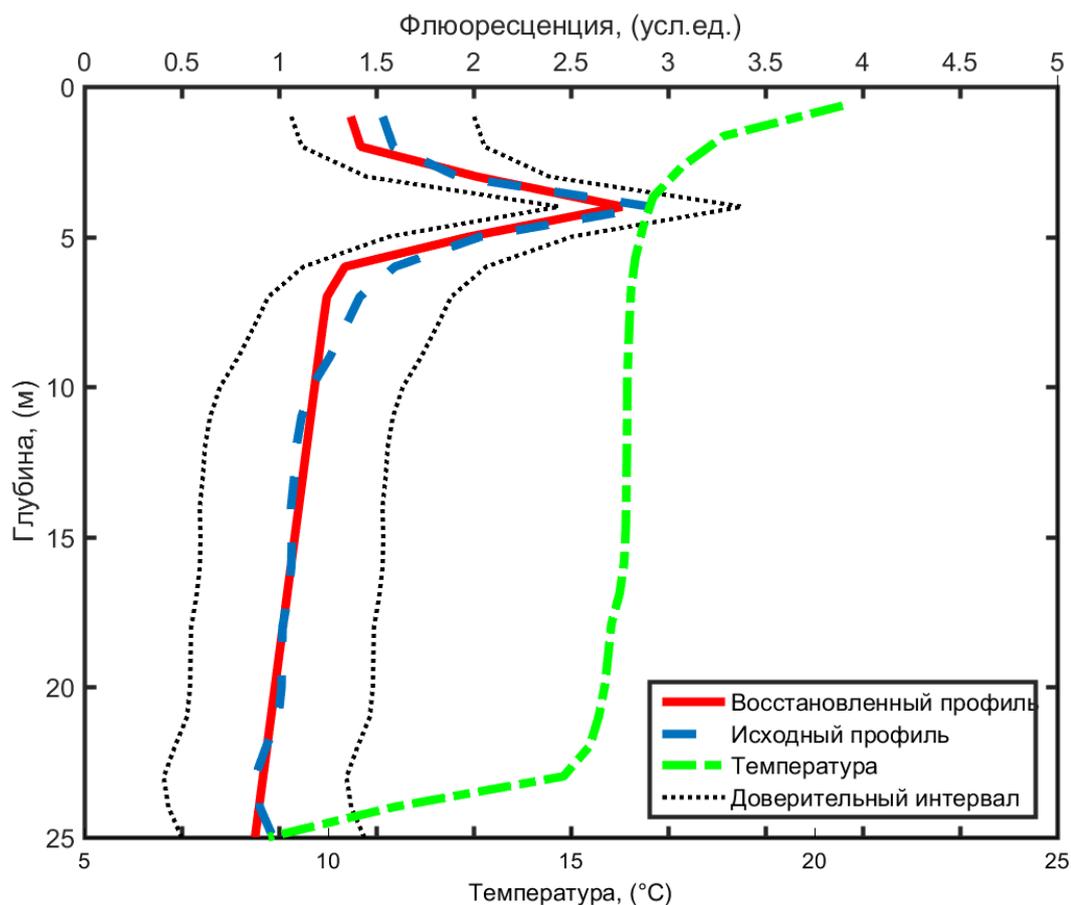


Рисунок 3.4. – вертикальное распределение изучаемых характеристик на станции 18 за 2012 год, Тип А по уравнению Matsumura и Shiomoto

Тип распределения А характеризуется наличием выраженного подповерхностного максимума на глубинах от 3 до 5 метров. Типу А присущи следующие статистические характеристики: максимальное значение флуоресценции, в среднем составляло 4,81, минимально значение 0,75; стандартное отклонение было равным 1,35; вертикальный градиент концентрации флуоресценции -0,02; Y_0 составляет 1,67.

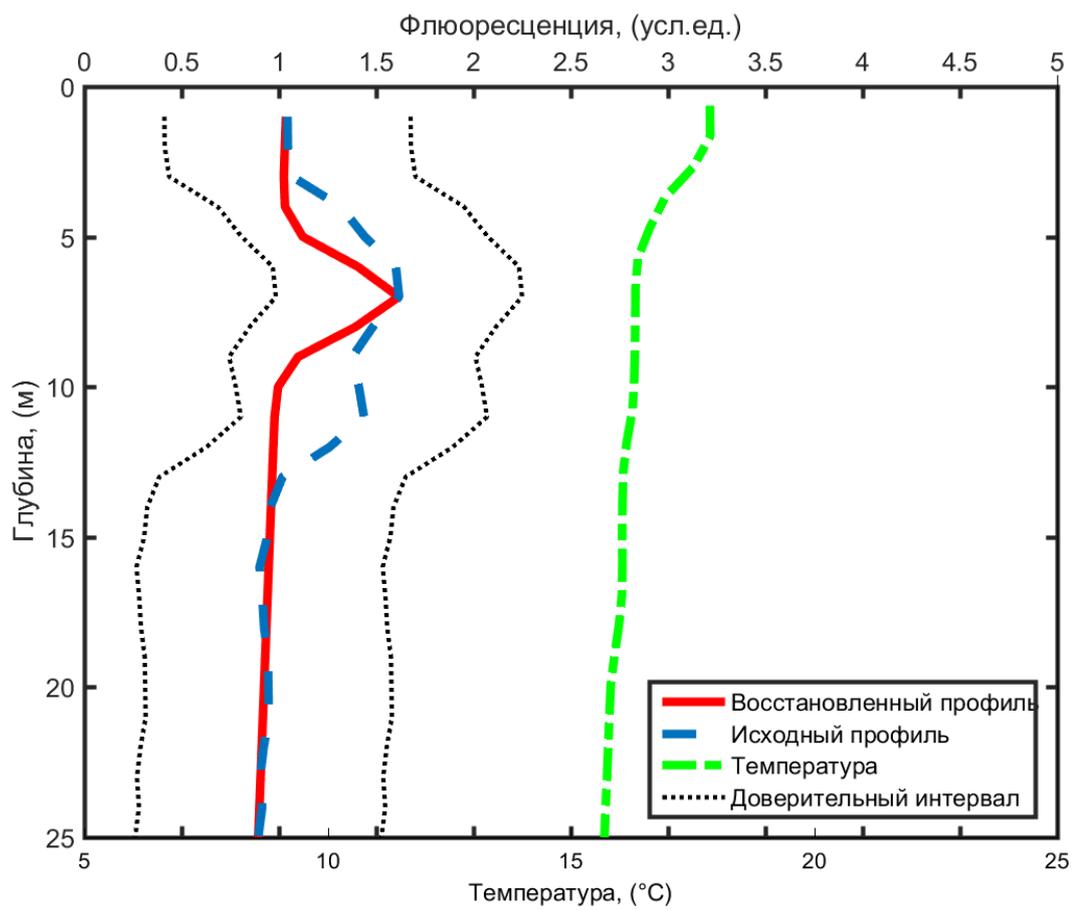


Рисунок 3.5. – вертикальное распределение изучаемых характеристик на станции 11 за 2012 год, Тип В по уравнению Matsumura и Shiomoto

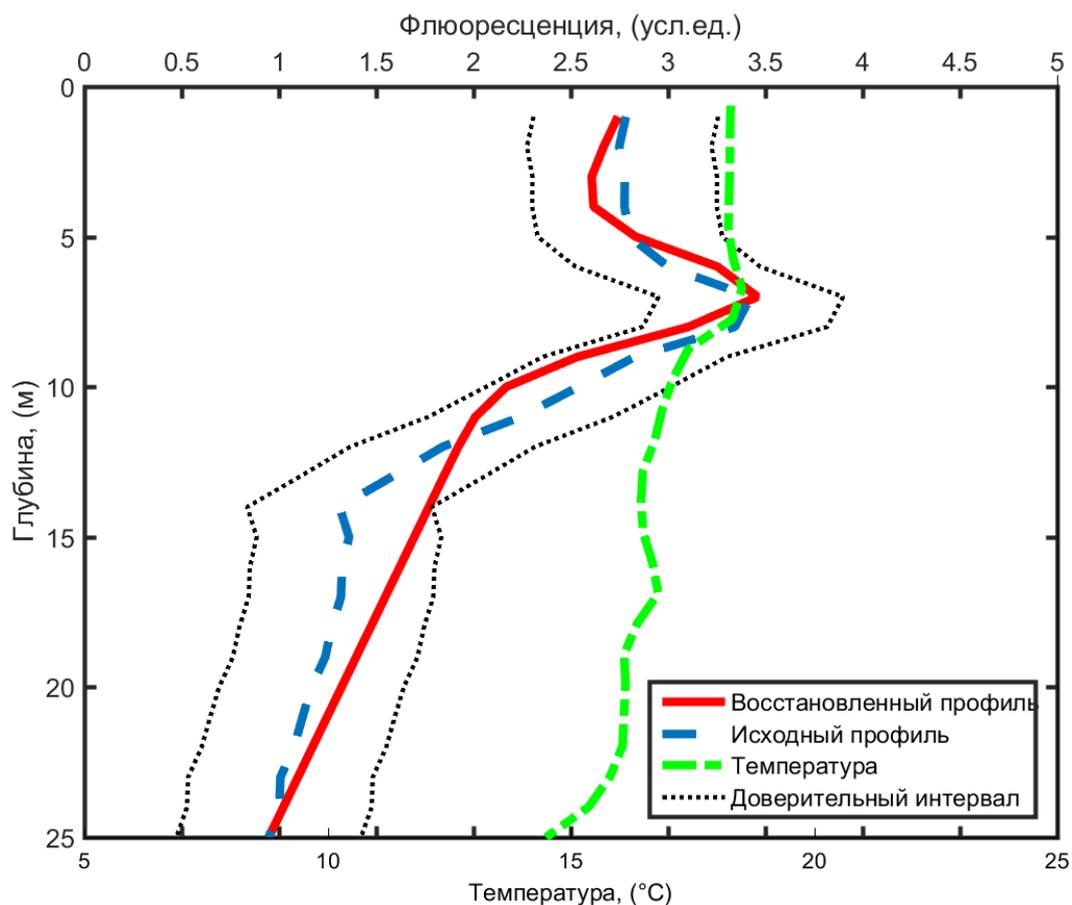


Рисунок 3.6. – вертикальное распределение изучаемых характеристик на станции 16 за 2012 год, Тип В по уравнению Matsumura и Shiomoto

Тип В, как правило, проявляется при интенсивном перемешивании. Для типа В соответствуют следующие статистические характеристики: максимальное значение флуоресценции, в среднем составляло 4,20, минимально значение 0,61; стандартное отклонение было равным 1,61; вертикальный градиент концентрации флуоресценции $-0,05$ (мг/м³/м); Y_0 составляет 2,15.

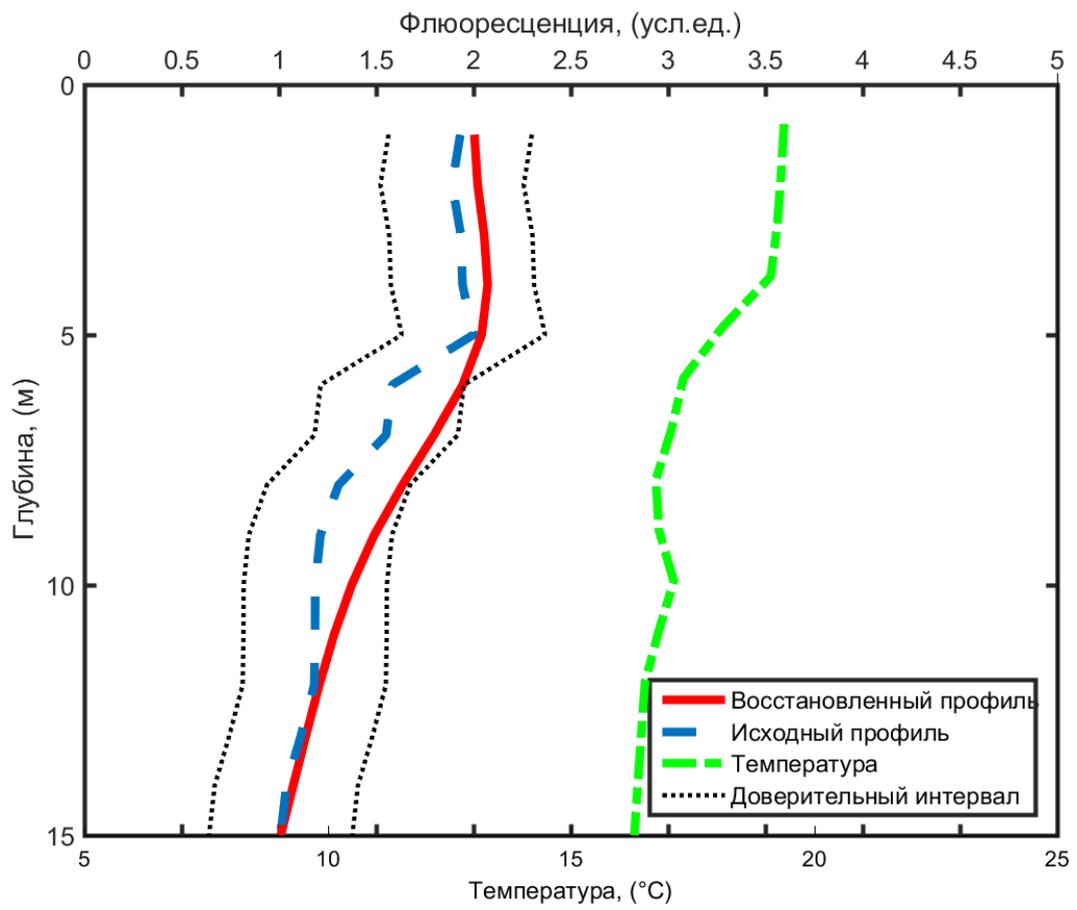


Рисунок 3.7. – вертикальное распределение изучаемых характеристик на станции 26 за 2012 год, Тип С по уравнению Matsumura и Shiomoto

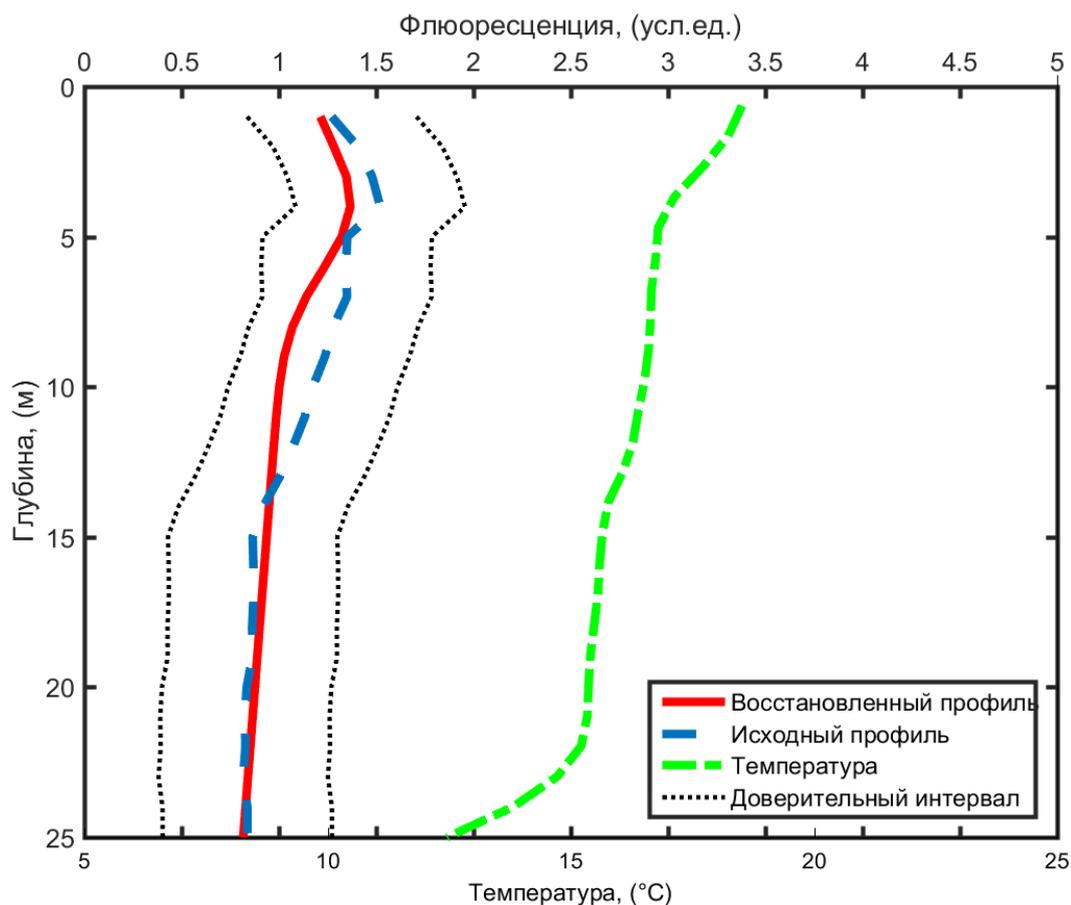


Рисунок 3.8. – вертикальное распределение изучаемых характеристик на станции 9 за 2012 год, Тип С по уравнению Matsumura и Shiomoto

Тип С появляется при сильном перемешивании в поверхностном слое и относительно равномерном распределении биогенов по глубине. Для типа С соответствовали следующие статистические характеристики: максимальное значение флюоресценции, в среднем составляло 2,64, минимально значение 0,92; стандартное отклонение было равным 2,74; вертикальный градиент концентрации флюоресценции -0,05 (мг/м³/м); Y_0 составляет 2,02.

Так же, в ходе работы были отмечены станции, где профиль по исходным данным восстановить не удалось. Эти станции были отмечены на маршрутной карте звездочкой (рисунок 3.9; рисунок 3.10).

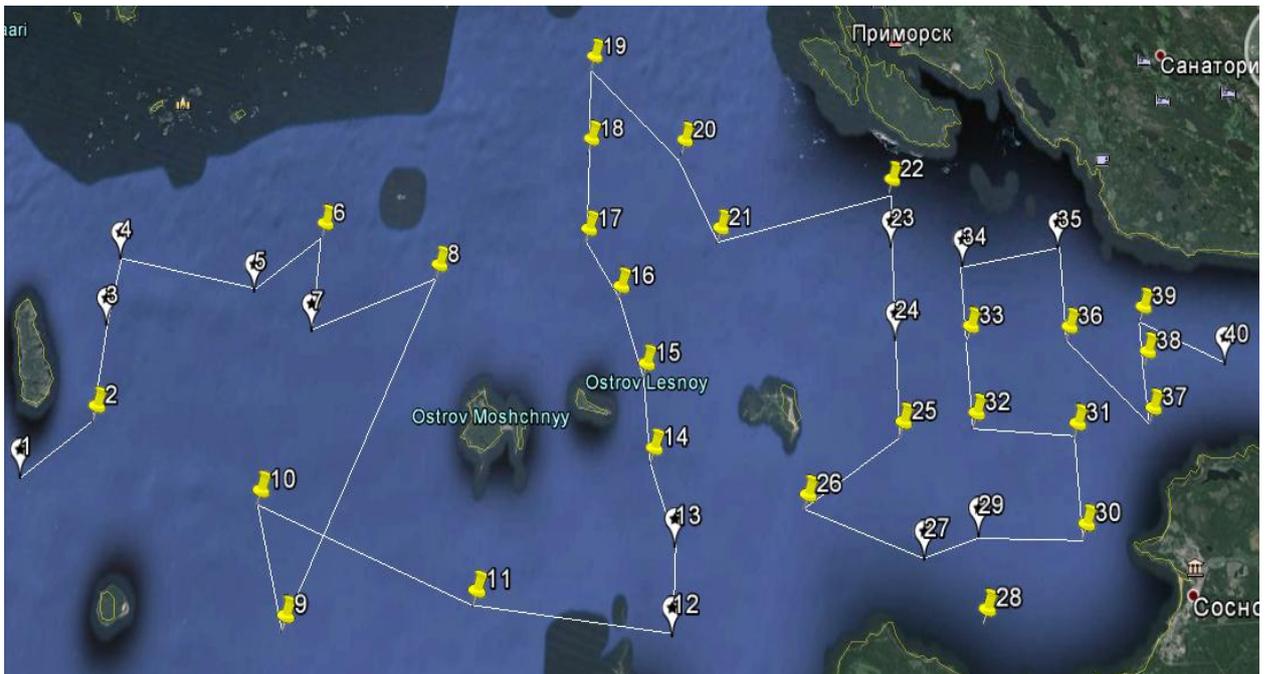


Рисунок 3.10. – Маркеры станций, где не удалось восстановить профиль по исходным концентрациям флюоресценции (2012 год)

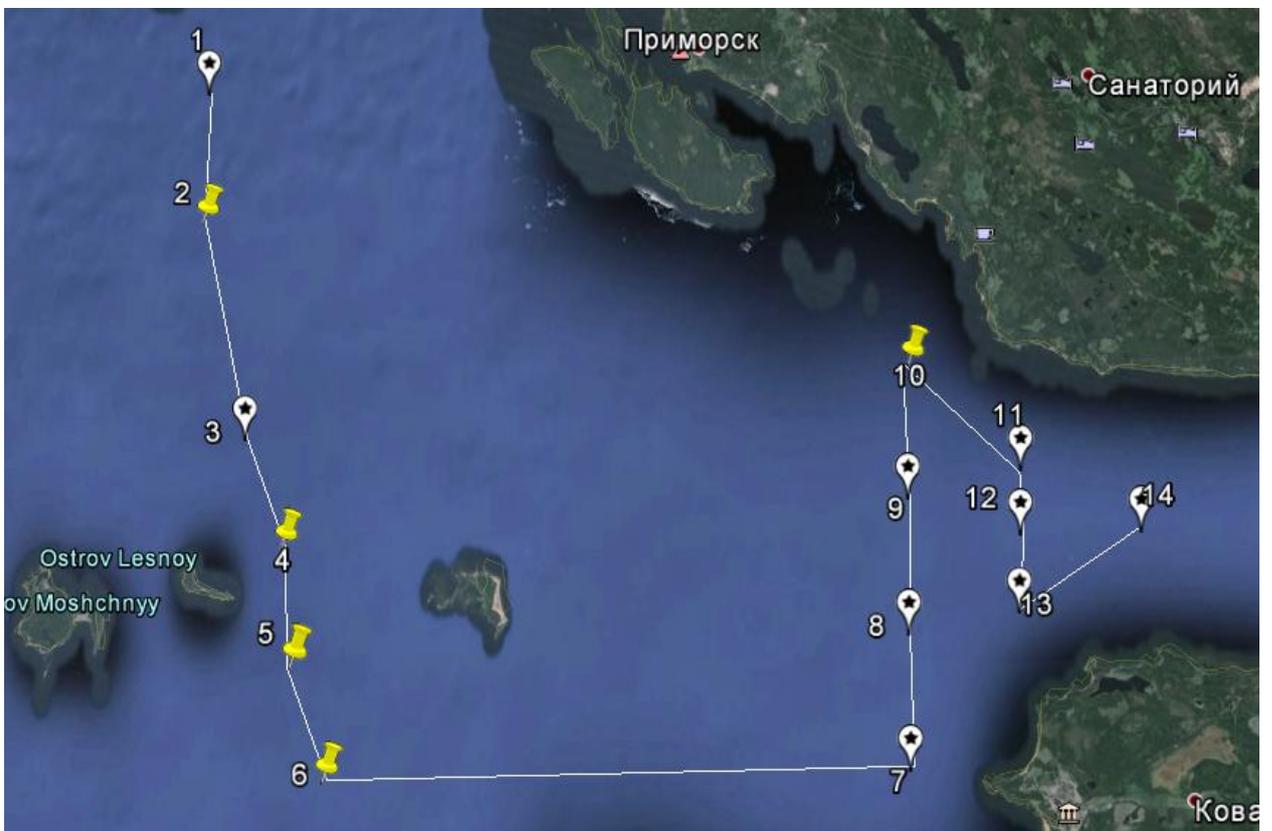


Рисунок 3.11. – Маркеры станций, где не удалось восстановить профиль по исходным концентрациям флюоресценции (2013 год)

Предварительный совместный анализ всех профилей флюоресценции и вертикального распределения хлорофилла позволяет предположить, что гидрологические условия оказывают влияние на вертикальные профили биооптических характеристик. Лето 2012 года по синоптическим данным отмечалось, как аномально жаркое. Высокие температуры приземного слоя атмосферы отмечались в весенние месяцы и продолжалась до октября. В ходе экспедиции работы временно прерывались в связи с прохождением сильного шторма. Во время шторма происходило интенсивное перемешивание и, как следствие, данные зоны становились зонами низких градиентов. Примеры таких станций представлены на рисунке 3.12 и на рисунке 3.13.

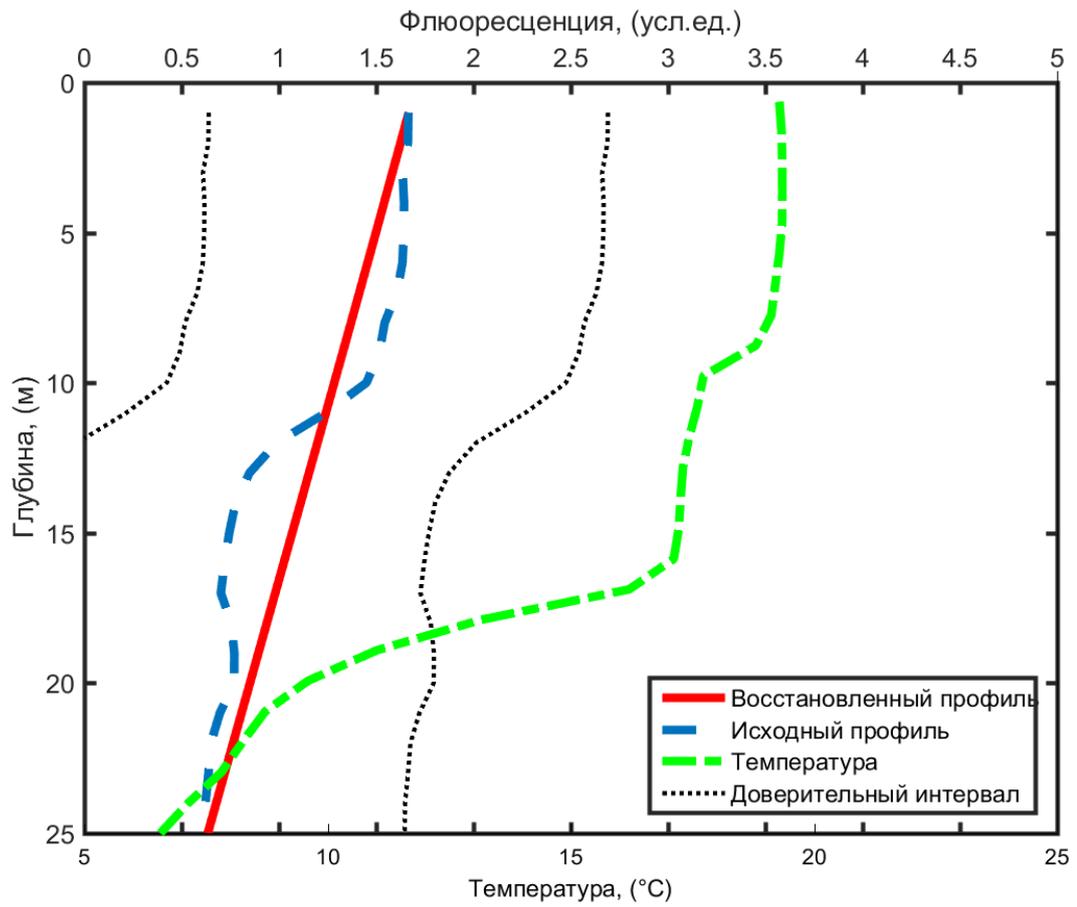


Рисунок 3.12 – вертикальное распределение изучаемых характеристик на станции 4 за 2012 год, оцениваемых уравнением Matsumura и Shiomoto

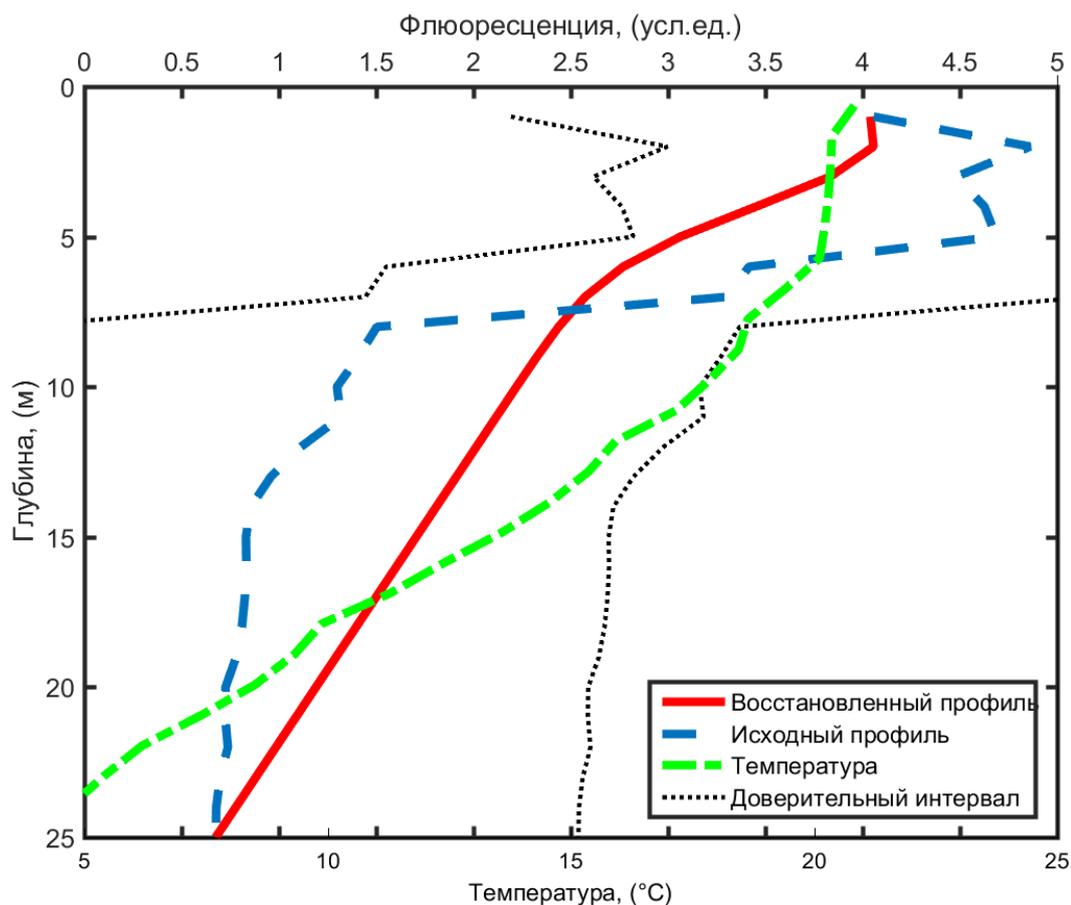


Рисунок 3.13. – вертикальное распределения изучаемых характеристик на станции 68 за 2013 год, оцениваемых уравнением Matsumura и Shiomoto

Так же был проведен анализ распределения изменчивости глубины прозрачности на флюоресценцию. Для этого использовались измерения с помощью диска Секки в ходе экспедиции за 2012-2013 годы. На рисунке 3.14 и 3.15 представлена изменчивость прозрачности по широте и долготе за 2012 год. Аналогично на рисунках 3.16 и 3.17 изменчивость прозрачности по широте и долготе за экспедиционный период для 2013 года.

Изменчивость прозрачности по широте (2012 г)

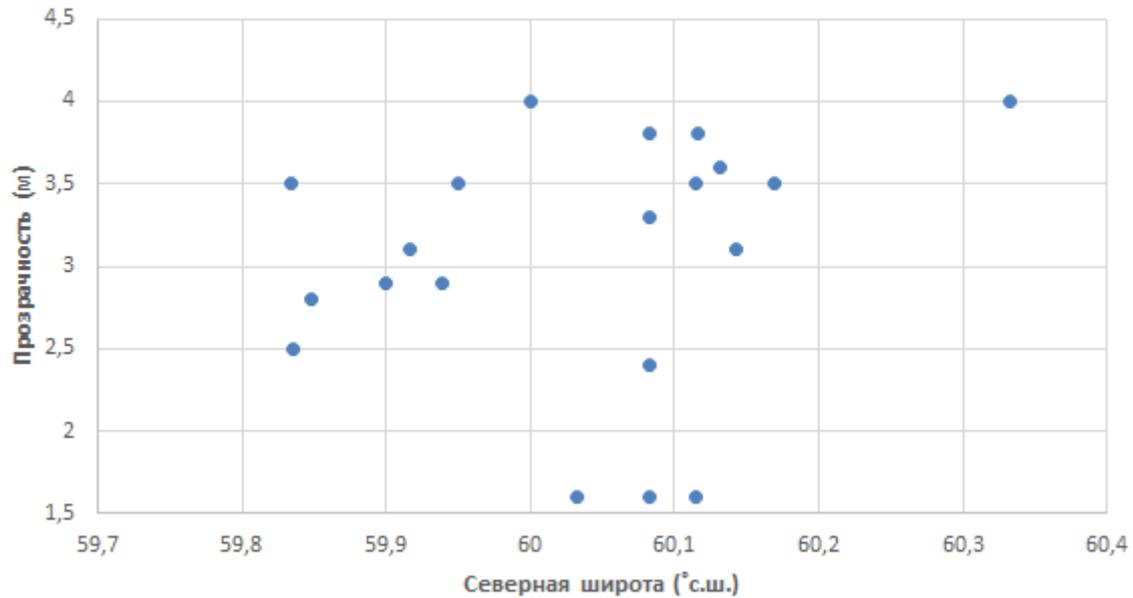


Рисунок 3.14 – изменчивость прозрачности по широте (2012 год)

Изменчивость прозрачности по долготе (2012 г)

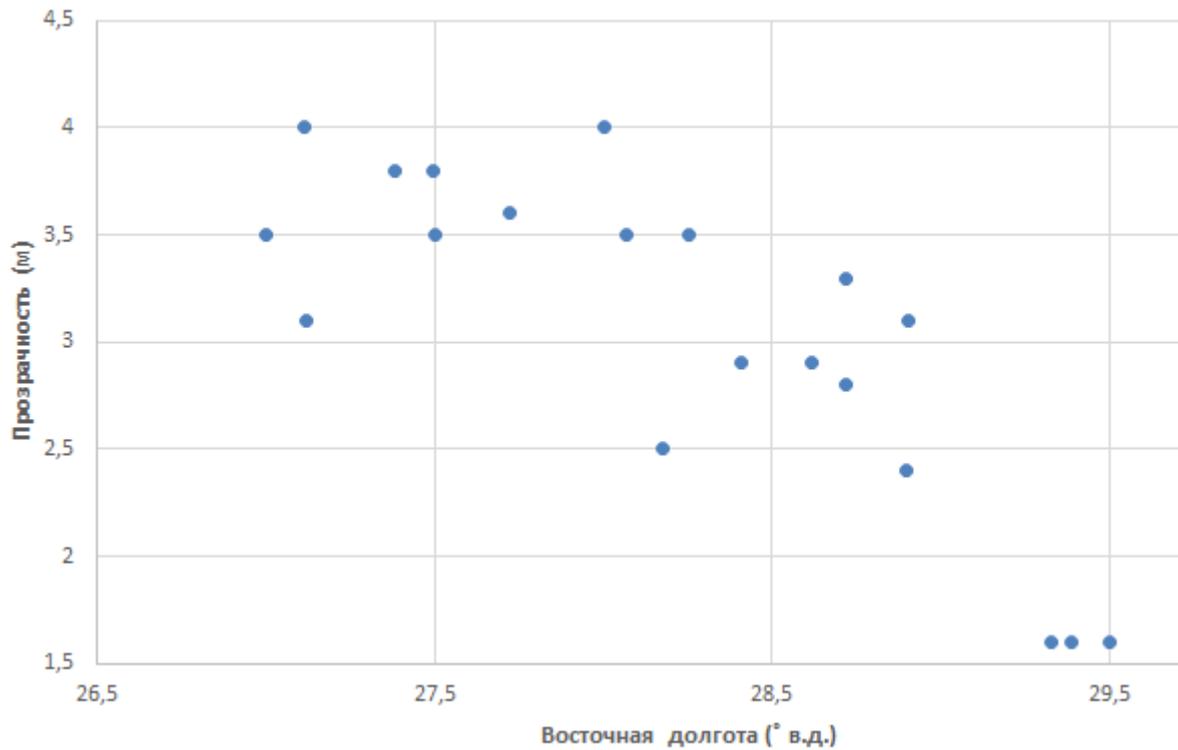


Рисунок 3.15 – изменчивость прозрачности по долготе (2012 год)

Как можно заметить, исходя из рисунка 3.14, изменение прозрачности по широте не значительно. По долготе, в свою очередь, происходит уменьшение значений в сторону Санкт-Петербурга, т.к. ближе к мегаполису глубина уменьшается и увеличивается количество взвешенных частиц в воде.

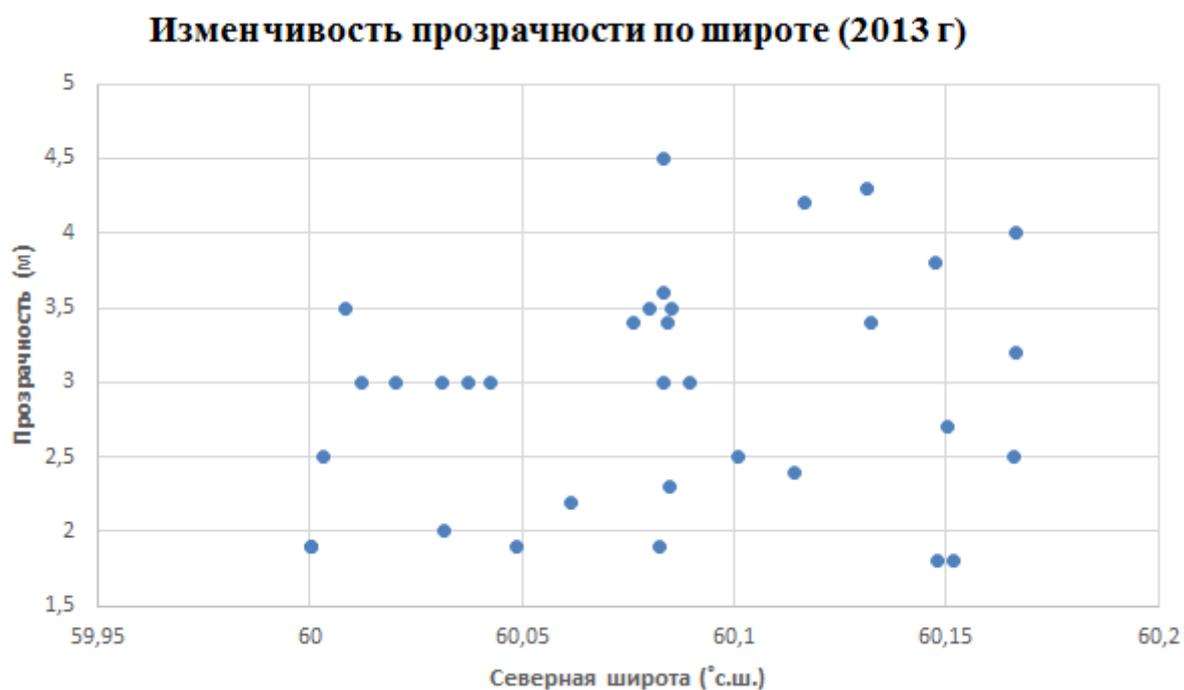


Рисунок 3.16. – изменчивость прозрачности по широте (2013 год)

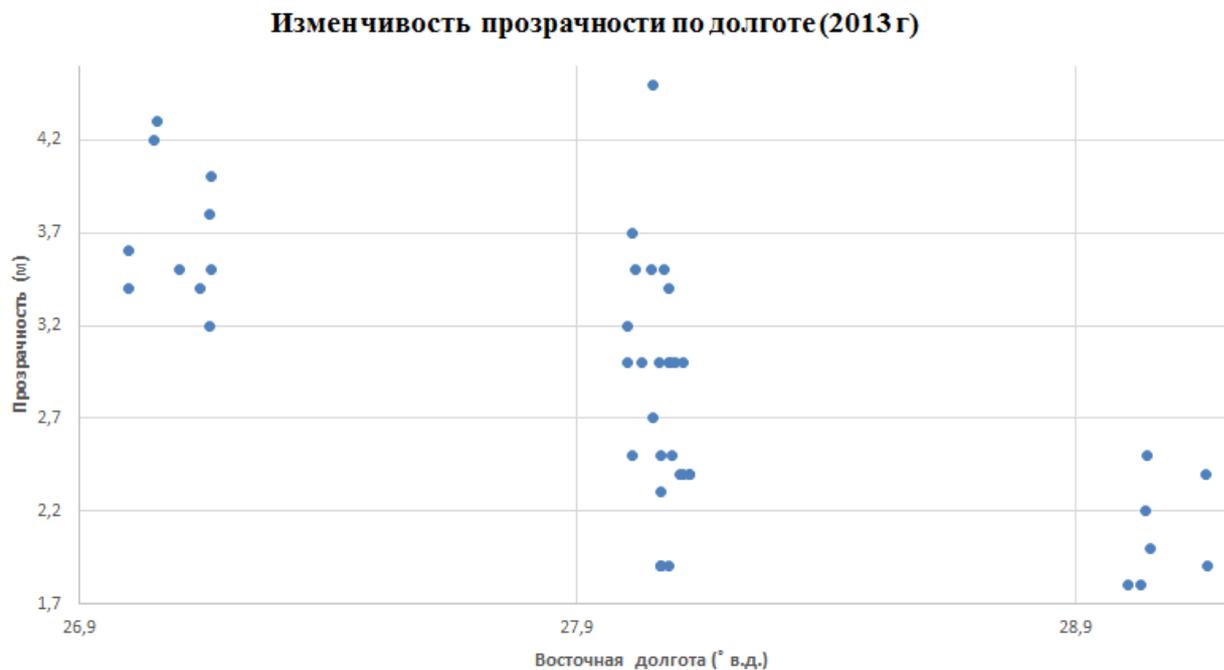


Рисунок 3.17 – изменчивость прозрачности по долготе (2013 год)

Схожие результаты, как видно из рисунка 3.16. и 3.17. были получены для 2013 года. Наибольшая глубина прозрачности находится на западе исследуемого района, в наиболее глубоководной части залива. Наименьшая глубина на северо-востоке, ближе к городу. Полученный результат хорошо согласуется с литературными и спутниковыми данными, представленными на рисунке 3.18, на котором видно направление распределения взвешенной примеси.



Рисунок 3.18. – спутниковый снимок Modis на 21.09.2006 г

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данный способ параметризации может успешно применяться в ситуации отсутствия экстремальных значений флюоресценции в верхнем слое, которая достигается при устойчивой стратификации верхнего слоя вод восточной части Финского залива и выраженном прогреве поверхностного слоя, а также при спокойной гидрометеорологической обстановке и достаточной прозрачности, обеспечивающей условия для развития и жизнедеятельности фитопланктона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведены основные результаты, полученные в ходе проведения данного исследования.

Проанализированы методы биооптического мониторинга водной среды. На данный момент имеются различные методы исследования: определение *in vivo* флюоресценции с помощью флюориметра; определение концентрации хлорофилла *in-situ* и дистанционными методами; измерение глубины прозрачности с помощью диска Секки.

Был проведен статистический анализ значений прозрачности и флюоресценции хлорофилла *in vivo* и по таким параметрам как: стандартное отклонение, максимальное и минимальное значение ряда, вертикальный градиент.

Так же, была проведена параметризация вертикальных профилей флюоресценции хлорофилла *in vivo* по модели Matsumura и Shiomoto, в ходе которой было выявлено три типа вертикального распределения флюоресценции хлорофилла и оценено качество работы использованной модели при различных гидрометеорологических условиях.

Был проведен пространственно-временной анализ биооптических характеристик. Глубина прозрачности увеличивалась в западном направлении. Широтная изменчивость не была выявлена, в связи с отсутствием данных по северному берегу восточной части Финского залива. Анализ вертикальных профилей флюоресценции за 2012 и 2013 года выявил общие закономерности формирования профилей. Наибольшее влияние на формирование профилей оказывают гидрологические условия.

Для дальнейшего понимания формирования профилей необходимо проводить дальнейшие исследования.

Список использованных источников

- [1] Моря России — Балтийское море [Электронный ресурс]. – свободный режим доступа: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-baltijskoe-more/> - русский язык. – (дата обращения: 29.05.2016).
- [2] Добровольский, А. Д., Залогин, Б. С. Моря СССР [Текст]. М., Изд-во МГУ, 1982, 192 с.
- [3] Обзор особенностей финского залива [Электронный ресурс]. – свободный режим доступа: <http://strana.ru/places/189982/info> - русский язык. - (дата обращения: 29.05.2016).
- [4] Гидрографическая характеристика финского залива [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: <http://izavi.narod.ru/Pr2> - русский язык. - (дата обращения: 29.05.2016).
- [5] Leppäranta M., Myrberg K. Physical Oceanography of the Baltic Sea. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2009.
- [6] Воды восточной части финского залива [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: <http://baltfriends.ru/arhiv/rus/ourvalue/ohv07.htm> - русский язык. - (дата обращения: 29.05.2016).
- [7] For Research on Cyanobacteria [Электронный ресурс]. – свободный режим доступа: <http://www-cyanosite.bio.purdue.edu/> – английский язык. – (дата обращения: 29.05.2016).
- [8] Физиология растений. Хлорофилл [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа: <http://fizrast.ru/fotosintez/pigmenty/hlorofilly.html> - русский язык. - (дата обращения: 29.05.2016).
- [9] З.М. Гришман, В.Ф. Левченко, Н.Н. Рыбалка, Е.Г. Савостьянова, О.А. Снеткова. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Опыт создания системы поддержки

принятия решений о водных ресурсах Санкт-Петербурга [Текст]. СПб НЦ РАН, Borey Print, 2001, с. 322-335.

[10] Weiju Wu. Temperature may be the dominating factor on the alternant succession of *Aphanizomenon flos-aquae* and *Microcystisae ruginosa* in Dianchilake//Fresenius Environmental Bulletin. - 2010. - № 5 - с. 846-853.

[11] Kees Bruning. Effects of temperature and light on the population dynamics of the Asterionella-Rhizophydium association//Journal of Plankton research -1991.- № 4 (13).

[12] Биоиндикация в водной среде [Электронный ресурс]. - свободный режим доступа:http://ecodelo.org/9571-432_bioindikatsiya_v_vodnoi_srede-4_bioindikatsiya_i_biologicheskii_monitoring - русский язык. - (дата обращения: 05.06.2016).

[13] Biogeosciences From the shape of the vertical profile of in vivo fluorescence to Chlorophyll-a concentration.- Biogeosciences, 8, 2391–2406, 2011. - A. Mignot, H. Claustre, F. D’Ortenzio, X. Xing, A. Poteau, and J. Ras

[14] Phytoplankton and Thermal Structure in the Upper Ocean: Consequences of Nonuniformity in Chlorophyll Profile. – journal of geophysical research, vol. 88m no. c4, pages 2565-2570, march 20, 1983., Marlon R. Lewis, John J. Cullen and Trevor Platt

[15] Chlorophyll Biomass off Sanriku, Northwestern Pacific, Estimated by Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) and a Vertical Distribution Model. - National Research Institute of Far Seas Fisheries, Orido 5-7-1, Shimizu, Shizuoka 424-8633, Japan. - Received 4 January 1998; in revised form 17 June 1998; accepted 17 June 1998

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Программный код расчета вертикального распределения изучаемых
характеристик в Matlab

```
clear all
clc
PathName = 'E:\';
NewFileName = 'Matsumota_check.xls';
ExcelFullName = [PathName NewFileName];

DovIntPathName = 'C:\Users\Desktop\';
sheet = 'matsumota';
xlRange = 'H2:H55';
DovIntFullName = [DovIntPathName NewFileName];

DovInt = xlsread(DovIntFullName,sheet,xlRange);

en = '.dat';
N = 25;
delimiterIn = ',';
headerlinesIn = 1;
deep = linspace(1, N, N);
mark = 15;

for i = 1:69
    if i<10
        beg = 'St00';
    else
        beg = 'St0';
    end
    bb = num2str(i);
    FileName = [beg bb en];
    FullName = [PathName FileName];
    if exist(FullName, 'file')

        A = importdata(FullName,delimiterIn,headerlinesIn);
        y=A.data(1:N, 2);
        y=y';
        temp = A.data(1:N, 1);
        tt=temp';
        Mx = mean(y);
        minY=min(y);
```

```

[Ymax, Zmax] = max(y);
TotCHL = sum (y);
horz = length(y);

for r = 1:N
    if r==1
        SS(r)=(y(r+1)-y(1));
    else
        SS(r)=( y(r) - y(r-1));
    end
    S=mean(SS);
end

B0 = minY-S*N;
Zt=0;

for r = 1:N

    h=Ymax-S*Zmax;

    Sx = h/(sqrt(2*pi)*(Ymax-y(1)-(S*Zmax)));
    ee = exp(-((deep(r) - Zmax)^2)/(2*Sx^2));
    Chl(r) = B0 + (S *r)+ (ee * (h/(Sx*sqrt(2*pi)))) ;

end

pDovInt = y + 0.95*DovInt(i-mark);
mDovInt = y - 0.95*DovInt(i-mark);
hh= figure;
pch1=plot(Chl, deep, 'r','LineWidth',4,'LineStyle','-'); hold on
py= plot(y, deep,'LineWidth',4,'LineStyle','-');hold on
ppDovInt = plot(pDovInt, deep,'LineWidth',2,'LineStyle',':', 'Color', 'k');hold
on
pmDovInt = plot(mDovInt, deep,'LineWidth',2,'LineStyle',':', 'Color', 'k');
%график
xlim([0 5])
set(gca,'XAxisLocation','Top','YDir','reverse', 'LineWidth', 2,'FontSize',12);

xlabel('Флюоресценция, (усл.ед.)');
ylabel('Глубина, (м)');
hold on

hleg1 = legend('Chl calc','Chl data');
set(hleg1,'Location','SouthEast', 'Color','None')

```

```

ax1 = get(gca,'Position');

ax2 = axes('XAxisLocation','bottom',...
          'YAxisLocation','right',...
          'YDir','reverse', 'ytick',[], 'Color','None',...
          'XColor','k','YColor','k');

pt=line(tt, deep,'Parent',ax2,'Color','g','LineWidth',4, 'LineStyle','-');
xlim([5 25])
xlabel('Температура, (°C)');

hold off

legend([pch1,py,pt,ppDovInt],'Восстановленный профиль','Исходный
профиль','Температура','Доверительный интервал',...
       'Location','SouthEast', 'Color','None');
FN=FileName;
figurename = ['Fluo', FN, '.png'];
print(hh , figurename, '-dpng')
else mark = mark + 1;
end

end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Вертикальное распределение изучаемых характеристик, оцениваемых уравнением Matsumura и Shiomoto на всех станциях за 2012-2013 годы

