

Содержание

Содержание	2
Глава 1. Обзор литературы.....	6
1.1. Фитопланктон и его первичная продукция.....	6
1.2. Факторы, влияющие на развитие фитопланктона.....	7
1.3. Фотосинтетические пигменты.....	11
1.4. Реакция фитопланктона на водный режим реки	13
1.5. Характеристика реки Енисей.....	14
Глава 2. Район и методы исследования	17
1.1. Характеристика района исследования.....	17
2.2. Методы исследования фитопланктона	22
Глава 3. Результаты исследований	27
3.1 Пространственно-временная динамика хлорофилла а фитопланктона	27
3.2 Валовая первичная продукция фитопланктона.....	29
3.3. Обсуждение результатов.....	34
Заключение	38
Список используемой литературы	40
ПРИЛОЖЕНИЕ	47

Введение

Одной из глобальных проблем нашего времени является экологическое состояние водных объектов. Первичная продукция представляет собою один из аспектов метаболизма природного сообщества, включающего в себя автотрофные организмы, процессы построения и разрушения органического вещества (ОВ) (Винберг, 1960; 1961). Первичная продукция – это скорость образования первичного органического вещества, синтезированного в результате процессов, использующих внешние источники энергии. Большая часть (более 95%) автохтонной первичной продукции в водных экосистемах образуется за счет фотосинтетической деятельности планктонных эукариотических водорослей и цианобактерий. На долю первичной продукции фитопланктона приходится около 40% от глобальной ассимиляции углерода. Следовательно, несмотря на то, что биомасса планктонных водорослей составляет около 2% от общей массы растений на Земле (Антал и др., 2001), их первичная продукция - это материально-энергетическая основа общей биологической продуктивности и ее количественная оценка имеет первостепенное значение для понимания протекающих в водоемах биологических и связанных с ними процессов.

В результате активной хозяйственной деятельности общества в водоёмах различного типа и в водотоках происходят значительные изменения, которые влекут за собой загрязнение, изменение продуктивности, ухудшение качества воды и т.п. Известно, что энергия в биологических системах способна трансформироваться. В цепи трофических превращений, первичным звеном являются продуценты (в том числе и водоросли), которые, используя энергию света, способны создавать органические вещества из неорганических материалов (например, из CO_2 и воды). В дальнейшем часть энергии (до 10%), не затраченная на обменные процессы организма, передаются на другие уровни – консументам первого порядка (Определение продукции популяций водных сообществ, 2000; Судницина, 2005). Поэтому основную роль в

создании энергетической и материальной основы в водоёме играют фитопланктонные организмы (Минеева, 2009).

Исследования первичного продуцирования и его главных факторов влияния (свет, температура или географическая широта в целом) являются важными задачами гидробиологии. Такие исследования позволяют понять, какие условия необходимы для обеспечения высокой продуктивности экосистемы, а какие её тормозят и замедляют. Поэтому в настоящее время гидробиологические исследования направлены не только на влияние антропогенного пресса, но и на влияние разнообразных климатических зон в целом (Минеева, Щур 2014).

Одним из любимых мест отдыха горожан Красноярска являются Абаканская протока реки Енисей, протекающая между островом отдыха и правым берегом. Этот участок реки активно используется населением в рекреационных целях, являясь местом купания, отдыха и ловли рыбы, также это является местом промыслового хозяйства (садки, в которых держат взрослую рыбу для продажи населению). К сожалению, протока подвержена интенсивному антропогенному прессу: сброс подогретых вод с ТЭЦ, выход ливневых стоков, рыбоводное хозяйство и зарегулирование протоки, что и поспособствовало появлению экологической проблемы. Проблемой стал активный рост высшей водной растительности и зеленой водоросли *Spirogyra* sp., основная масса которой разлагается в верхних слоях водоёма, что негативно сказывается на туристической индустрии города и качестве жизни местных жителей, лишая их полноценного места отдыха (Кравчук и др., 2020).

Цель работы – оценка валовой первичной продукции фитопланктона в Абаканской протоке р. Енисей.

Задачи:

1. Определить валовую первичную продукцию (ВПП) фитопланктона методом ингибиторной флуоресценции.
2. Проанализировать пространственную и сезонную динамику ВПП фитопланктона за два года исследования.

3. Выявить влияние разных факторов на ВПП фитопланктона.

Работа проводилась в рамках проекта «Оценка экологического состояния Абаканской протоки реки Енисей в г. Красноярске, определение предпосылок его ухудшения и выработка рекомендаций по его улучшению» проделан при поддержке Красноярского краевого фонда науки (2019-2021гг.)

Автор выражает искреннюю благодарность к.б.н., заведующей Аналитической лаборатории Института биофизики СО РАН О.Н. Анищенко (Барсуковой) за консультации по теме работы и предоставления результатов для гидрохимического анализа. Автор благодарен к.б.н., доценту кафедры водных и наземных экосистем И.В. Зуеву и магистру С. Андрущенко за консультации по статистическому анализу данных.

Глава 1. Обзор литературы

1.1. Фитопланктон и его первичная продукция

Фитопланктон (от греч. «планктос» – парящий, блуждающий) – водоросли, в основном микроскопические организмы, обитающие в слое воды во взвешенном состоянии. В основном к фитопланктонным организмам относятся виды диатомовых, золотистых, зелёных, динофитовых водорослей и цианобактерий (Садчиков, 2003).

Фитопланктон играет главную роль в формировании органики с помощью фотосинтеза в водохранилищах и крупных водоёмах, а также является продуцентом в трофической цепи питания, образуя энергетическую основу для следующих этапов продукционного процесса. Из-за короткого цикла развития и большого разнообразия видов планктонные организмы способны быстро приспосабливаться к окружающим условиям среды (Руководство по гидробиологическому мониторингу..., 1992; Минеева, 2009).

Первичная продукция – это скорость образования органического вещества, которое образуется в биоценозе благодаря продуцентам за единицу времени на определённой площади или в определённом объёме. Выражается в единицах массы (или эквивалентных единицах) за время (Дубовская и др., 2021). Фотосинтез является главным источником органического вещества, образующегося в воде. Органика поступает в водоём в виде биомассы хлорофилл-содержащих растительных организмов. Кроме того, на физико-химические свойства водных экосистем влияет кислород (O_2), выделяясь при фотосинтезе, оказывая влияние на условия жизни планктона, бентосных и эпифитных макрофитов и водорослей. Формирование первичной продукции в озёрах и реках является не только результатом автотрофного фотосинтеза, но и результатом фотосинтеза бактерий и хемосинтеза (Алимов, 1989).

При участии хлорофилла, в процессе фотосинтеза энергия видимого света преобразуется в потенциальную энергию органических веществ. В процессе расщепления воды образуется газообразный кислород, а углерод

образуется из восстановленного из воды водорода и диоксида углерода. Помимо этого, вновь образуется вода. При отсутствии света – фотосинтез не происходит, как и потребление углекислого газа с дальнейшим выделением O_2 . Благодаря показателям CO_2 и O_2 во время фотосинтеза можно определить первичную продукцию. Она, в свою очередь, делится на первичную валовую продукцию и чистую (Винберг, 1960; Котелевцев и др., 2015).

Валовая первичная продукция (общая) (ВПП) – количество органического вещества, создаваемое автотрофами в процессе фотосинтеза за определённый промежуток времени на определённой площади или объёме (Алимов, 1989). Иначе говоря, это величина скорости образования органического вещества. Но стоит принять во внимание, что не всю органику стоит считать как массу, которая идёт на увеличение фотосинтезирующих организмов. Часть её идёт на индивидуальные физиологические потребности самих автотрофов – на дыхание (Котелевцев и др., 2015).

Чистая первичная продукция (ЧПП) – количество органического вещества, создаваемое автотрофами в процессе фотосинтеза за единицу времени на определённой площади или объёме, за исключением количества вещества, которое расходуется за это время на рост и дыхание автотрофов. Говоря иначе, ЧПП это разность между ВПП и той ее частью, которая была затрачена в процессе дыхания всем планктонным сообществом (Алимов, 1989; Садчиков, Кудряшов 2018).

1.2. Факторы, влияющие на развитие фитопланктона

На развитие и функционирование фитопланктона могут влиять несколько факторов, тесно связанных между собой. Сюда относится солнечная энергия, содержание биогенных веществ (в основном это фосфор и азот), динамические процессы водоёма, связанные с проточностью, перемешиванием и водообменом, а также на развитие может влиять и конкуренция с другими растительными и животными организмами (Минеева, Бикбулатова, 2008). Например, для фотосинтезирующих организмов одним из

важных факторов является свет. Но на степень его использования влияют уже другие экологические факторы: количество кислорода и углерода в воде, прозрачность и температура, рН, количество биогенных макро- и микроэлементов и др.

Но как именно влияет каждый фактор? Например, свет. Как известно, световой день в водоёме короче, чем на поверхности. Часть солнечных лучей, попадая на поверхность водной глади, отражаются от неё. Другая часть, преломляясь – проникает вглубь. Также на отражение солнечного света влияет угол падения лучей (Садчиков, 2004). Например, если солнечные лучи падают под углом 0° (солнце в зените), то в водоём поступает 98% от всей радиации. Поэтому, максимум проникающего света происходит между 10 утра и 14 часами дня. Или если угол падения равен 30° , то в воду попадает уже 75% радиации. Когда солнце находится на горизонте, то лучи отражаются почти полностью. То есть, чем больше угол падения, тем меньше света попадает в водоём (Давыдов и др., 1973).

Как известно, не весь свет проникает в воду. Часть поглощается молекулами воды, другая – растворёнными веществами, которые находятся в водоёме. Но больше всего качество проникновения солнечных лучей снижают планктонные организмы (особенно это наблюдается во время «цветения» воды в водоёме) (Судницына, 2005).

Также освещённость способна влиять на вертикальные и сезонные распределения планктона. Например, фитопланктон в озёрах, из-за более низкой прозрачности воды, обычно находится в верхних слоях (10-15 м глубины). Если в водах очень низкая прозрачность, то фитопланктон может обитать и на глубине 2-3 м (Жизнь растений, 1977).

Количество солнечной радиации также влияет и на температуру воды. Это, в свою очередь, влияет на интенсивность фотосинтеза и на количество создаваемых органических веществ, которые распределяются в толще воды (Судницына, 2005). Например, в водоёмах, которые участвуют в охлаждении ТЭЦ происходит повышение температуры, что, в свою очередь, влияет на

увеличение вегетационного периода, прирост биомассы растений или появление теплолюбивых видов (Садчиков, Кудряшов 2004). Поэтому температура – ещё один важный фактор, который способен влиять на процессы метаболизма водорослей, хоть у них и широкий температурный диапазон, в котором они могут существовать.

Также на развитие живых организмов в водоёме может влиять динамический режим вод. Например, в спокойной воде особенно любят развиваться цианобактерии. В случае турбулентного перемешивания может наблюдаться продуктивный рост диатомовых водорослей (в спокойной воде они опускаются на дно из-за тяжёлых оболочек) (Судницина, 2005).

Влияние динамического режима зависит от глубины водоёма. Например, в глубоководных водоемах повышается снабжение планктона питательными веществами, в мелководных – интенсивное движение воды лишь повышает мутность, что снижает развитие планктона. Но, с другой стороны, интенсивное перемешивание воды положительно влияет на скорость дыхания и увеличивает усвоение фосфора (Киселёв, 1969).

Ещё одним из наиболее важных факторов, который влияет на рост водных организмов, является химический состав водоёма. К химическому фактору относятся солёность воды, содержание питательных веществ – соли азота, фосфора, для некоторых водорослей – содержание железа и кремния (Жизнь растений, 1977). Одним из основных элементов является азот, который участвует в фотосинтетическом аппарате автотрофов (Судницина, 2005). Различные азотистые соединения могут поступать в виде неразложившихся органических остатков и со стоками вод. Также в поступлении азота участвуют азотфиксирующие бактерии в верхних слоях ила, которые усваивают газообразный азот, образуя соли, тем самым снабжая пищу фитопланктона (Кожаева и др., 2013).

При отсутствии азота в клетках цианобактерий происходит разрушение фикобилинов (пигменты, в состав которых входит азот). Разные соединения азота (аммиак, нитриты и нитраты) являются индикатором, с помощью

которого можно оценить качество воды и степень минерализации азота, кроме того они помогают судить о токсичности водоёма. Высокая концентрация данных веществ действует отрицательно на животные организмы (в том числе и на человека) (Судницына, 2005).

Содержание отдельных форм азота в течение года не постоянно. Оно способно меняться в зависимости от интенсивности потребления организмами, также концентрации азота способны повышаться, поступая извне. Например, концентрация нитратов в летний период очень мала, и равна сотым долям миллиграмма в одном литре. А в осенне-зимний период повышается до десятых долей мг/л из-за разложения отмерших организмов. Также концентрация различных форм азота может повышаться из-за поступления в воду бытовых загрязняющих веществ (концентрация способна достигать до 100 мг/л) (Paerl, 1979).

Ещё одним важным химическим элементом, играющим роль в развитии автотрофов, является фосфор, который в органических соединениях имеет вид солей фосфорной кислоты. Высокий приток фосфора можно наблюдать в июне-июле с поступающей водой с удобренных полей (Кожеева и др., 2013).

Как известно, в составе биологических организмов можно встретить соединения фосфора, которые отвечают за регуляцию энергопроцессов в клетке. В воды фосфор попадает вследствие процессов жизнедеятельности живых организмов и их распада после смерти. Также попадает благодаря выветриванию, растворению фосфатных пород, поступление с поверхности водосбора, со сточными водами (применение фосфорных удобрений, полифосфатов в моющих средствах, флотореагентов) или с водами с производства. При отсутствии фосфора происходит остановка развития и роста макрофитов и водорослей (РД 52.24.382-2019).

Но большие концентрации азота и фосфора могут оказывать отрицательное воздействие на водоём. Например, вызывать интенсивное размножение фитопланктонных организмов с последующим «цветением» воды. Это, в свою очередь, приводит к снижению содержания растворённого

O₂, повышение pH, появление токсинов, которые вырабатываются цианобактериями, что приводит к гибели животных организмов (особенно это влияет на рыб) (Белоногова, 2016).

Для развития некоторых видов водорослей (например, диатомовых) важно наличие растворённого кремния (присутствует в виде соединений кремниевой кислоты). Он активно участвует в метаболизме клеток (створки диатомей состоят из кремнезема), способствует увеличению численности и размеров клеток, влияет на количественный рост (образование колоний) и также способствует развитию и появлению новых видов диатомовых водорослей. Но большая концентрация кремния (более 2 мг/л) действует отрицательно на развитие цианобактерий, ингибируя их рост (Ходоровская, Стурова, 2002).

1.3. Фотосинтетические пигменты

Как известно, основную роль в фотосинтезе растительных организмов играют фоторецепторные пигменты. Пигменты – это окрашенные вещества, которые способны поглощать свет определённых длин волн. Помимо этих функций, они также могут определять свой цвет и окраску, отражая непоглощенные участки спектра. Выделяют группы пигментов: хлорофилл, каротиноиды и фикобилины. Хлорофилл – зелёный пигмент, который содержится в большинстве растений и отвечает за фотосинтез. Зелёный цвет пигмента обусловлен отражением зелёных лучей и поглощением красных и синих лучей солнечного спектра. Известно, что солнечный свет состоит из множества длин волн, но видимой для человеческого глаза остаётся диапазон от 400 до 700 нм, что соответствует цветам от фиолетового до красного (Якушкина, 1980).

Различают более 10 видов хлорофилла, которые отличаются окраской и распространением среди живых организмов. Хлорофиллом зелёных растений является *a* и *b*. Также существует хлорофилл *c*, который находится в

диатомовых водорослях, а в водорослях отдела *Rhodophyta* – хлорофилл *d* и *e* (Медведев, 2012).

Известно, что хлорофилл имеет флуоресцентные свойства, которые выявляются в виде свечения вещества при поглощении энергии в виде квантов света. При поглощении света электрон молекулы хлорофилла *a* переходит в возбуждённое состояние и испускает избыток энергии в виде свечения. Такое свечение регистрируется специальным прибором – флуориметром. Данный прибор используется для исследования микроводорослей. Общий принцип работы состоит в том, что кювету с пробой облучается коротковолновым светом (сине-зелёная область). Перед регистрирующим устройством расположен красный светофильтр, который пропускает только флуоресценцию, отрезая возбуждающий свет (Гладышев, 1999).

Каротиноиды – пигменты жёлтого или оранжевого цвета, которые имеют полиизопреновую природу. В основном у высших растений встречаются β -каротин и ксантофилл. Каротиноиды, улавливая длины волн в диапазоне 280-550 нм, также способны поглощать свет с помощью сопряжённых двойных связей, с последующей передачей полученной энергии на молекулы хлорофилла, предотвращая их разрушение в ходе фотоокисления (Медведев, 2012).

Фикобилины также являются светопоглощающим пигментом красного и синего цвета некоторых групп водорослей (красных, криптофитовых и др.) и цианобактерий. Они также передают энергию на хлорофилл, поглощая её в зелёной и жёлтой участках спектра (Чиркин, 2006). Основными пигментами фикобилинов являются фикоэритрины, которые встречаются у красных водорослей и поглощает участки 495-565 нм солнечного спектра, и фикоцианины – пигменты цианобактерий, поглощающие 550-615 нм (Якушкина, Бахтенко, 2005).

Таким образом, в фитопланктоне из-за значительного разнообразия видов водорослей разных отделов встречаются практически все виды хлорофиллов, фикобилинов и большая часть ксантофиллов в составе

светособирающего комплекса, что в полной мере способствует формированию валовой первичной продукции.

1.4. Реакция фитопланктона на водный режим реки

Известно, что планктонное сообщество является основой для водной пищевой цепи. Благодаря довольно высокой скорости роста численности, водоросли способны отражать изменения, происходящие в экосистеме, например, антропогенное воздействие или изменение гидрометеорологической обстановки (Минкина, 2020).

Поэтому изменение гидрологического режима довольно сильно сказывается на фитопланктонном сообществе. Например, половодье. При повышении уровня воды в водоёме могут иметься разные последствия.

1. Увеличение аллохтонного органического вещества (например, повышение концентрации аммонийного азота из-за подтопления почв и болот в нижнем Амуре) (Фишер, Шестёркин, 2016).
2. Повышенная минерализация воды в послепаводковый период.
3. Появление новых видов и смена доминантов в альгофлоре фитопланктона. Например, в работе Кондаковой и Дабах (2021) было отмечено, что после паводков на озере в числе доминирующих видов была замечена *Asterionella formosa*, которая также является индикатором чистой воды. В работе Паутовой с соавторами (2012) сообщалось что, повышение концентрации кремния в Чёрном море привело к количественному росту диатомовой водоросли *Pseudosolenia calcar-avis*.
4. Очистка и поступление новых вод (паводки способны промывать озёра (иногда и до самого дна) или смывать слой воды, что может способствовать очищению водоёма) (Кондакова, Дабах, 2021).

На развитие фитопланктона в условиях мелководья влияет комплекс внешних факторов. Благоприятно влияют на развитие более интенсивный прогрев воды и повышенное содержание биогенных элементов. Но также

мелководье оказывает обратное воздействие: динамическая нестабильность и высокое содержание взвешенного вещества. Это в свою очередь ухудшает прозрачность воды. Для примера, выявлена зависимость развития фитопланктона от режима регулирования стока на Куйбышевской ГЭС, где концентрация хлорофилла *a* в летнюю межень снизилась в 9–15 раз в результате двукратного увеличения водообмена на водохранилище (с 0.011 в 2016 г. до 0.021 сут⁻¹ в 2017 г.) (Рахуба, 2020).

Этот вопрос интересен для нас, так как на р. Енисей в 2021 году был очень высокий уровень воды из-за поздних летних паводков, сформированных большими запасами снега в зимнее время, а в 2022 году, из-за малого количества зимних и летних осадков, был аномально низкий уровень воды за последние 50 лет. Таким образом, вопрос как влияет уровень воды на формирование ВПП фитопланктона остается открытым.

1.5. Характеристика реки Енисей

Енисей является одной из самых длинных и полноводных рек мира. Исток реки расположен в Саянских горах, считается, что это озеро Кара-Балык. Здесь она идёт через пороги к Тувинской котловине. В межгорной котловине у г. Кызыла он сливается с Малым Енисеем (Каа-Хем) и образуется р. Енисей. Длина реки от места слияния до устья составляет 3487 км. Для бассейна Енисея характерна асимметричность: его правобережная часть в 5 раз больше левобережной (Грезе, Сычева, 1964; Продукционно-гидробиологические исследования..., 1993).

Река Енисей также делится на Верхний, Средний и Нижний. Верхний Енисей берёт начало в месте слияния Большого и Малого Енисея и продолжается около 600 км до водохранилища Красноярской ГЭС, протекая в горно-таёжных областях. Здесь начинается Средний Енисей, длина которого составляет примерно 750 км. Протекая по степи и лесостепи Хакасии и вступая в зоны тайги у Красноярска, река продолжается до Ангары. Далее – Нижний

Енисей (около 1820 км), который заканчивается уже в Усть-Порту. Северный полярный круг река пересекает в 10 км севернее Курейки (Вышегородцев, Заделенов, 2013).

Для р. Енисей характерна большая скорость течения из-за большого уклона русла реки, и на всём протяжении реки она колеблется от 7 до 0,24 м/с. Максимальные скорости течения можно увидеть во время паводков, а минимальные – зимой. На прозрачность воды в реке влияет сезон, глубина, скорость течения, тип грунта и др. Весной она наименьшая и колеблется около 0,3-0,5 метров, а в осенне-зимний период она повышается и может достигать до 3 метров и более (Грезе, Сычева, 1964).

Так как р. Енисей протекает в разных физико-географических и природных условиях, температура реки в разных местах колеблется. В 2013 году была отмечена температурные колебания от 13 °С до 15 °С на участке от Красноярского водохранилища до Дудинки (Вышегородцев, Заделенов, 2013). Так как в средней части р. Енисей находится высоконапорное водохранилище, температура реки в летний период достигает максимум 10 °С. Влияние холодных вод продолжается на 330 км вплоть до впадения Ангары в Енисей (Апонасенко и др., 2010).

Основными гидрохимическими особенностями р. Енисея являются: низкая мутность, низкая солёность (около 100 мг/л) и концентрация органического углерода около 10 мг/л. До сих пор исследование первичной продукции водорослей остаётся актуальным вопросом и им занимаются в различных частях нашей страны. Также актуальным в наши дни остаётся и изучение состояния р. Енисей. Например, в 2006 году активно исследовали состояние экосистемы многих водоёмов севера Восточной Сибири (Щур, 2006).

В 2007-2008 годах изучалось воздействие притоков на экологическое состояние реки Енисей, в результате которого были установлены особенности динамики концентраций биогенных и органических веществ, бактерио- и

фитопланктона и хлорофилла на разных участках р. Енисей (Апонасенко и др., 2010).

В работе Ю. А. Пономаревой (2015), в которой рассматривается фитопланктон нижнего бьефа Красноярской ГЭС, установлено, что более 50% составляли такие планктонные виды: *Cyclotella radiosa*, *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella formosa* и *Diatoma vulgare*. Автор указывает, что некоторые виды давали вспышки. Например, в 2011 г. были отмечены *Melosira undulate* (Ehr.) Kutz. и *Nitzschia recta* Hantzsch, а до этого, в 2008 г., была вспышка *Gomphosphaeria lacustris* Chod. Также данный автор установил, что в видовом разнообразии водорослей в нижнем бьефе Красноярского водохранилища присутствуют 36 водорослей смешанного планктонно-бентосного типа местообитаний.

В настоящее время в составе водорослей р. Енисей преобладают бентосные и перифитонные формы, составляющие 43 вида (примерно 57% от общего числа видов) (Пономарева, 2015).

Первые исследования первичной продукции фитопланктона на р. Енисей относятся к 1984-1987 гг. А.Д. Приймаченко с соавторами указывает, что наименее продуктивным оказался участок реки от плотины Красноярской ГЭС до устья р. Кан. Они отмечают, что количество фитопланктона здесь мало и планктонные водоросли, сбрасываемые в нижний бьеф из Красноярского водохранилища, из-за течения не успевают развиваться (Продукционно-гидробиологические исследования..., 1993). Однако отметить, что в олиготрофной р. Енисей развитие фитопланктона в целом достаточно слабое и необходимо исследовать ВПП фитопланктона, так как это составное звено энергии поступающей в экосистему. Основную конкуренцию ему составляет фитоперифитон, который перехватывает поступающие в реку питательные вещества и имеет значительный уровень первичной продукции (Anishchenko et al., 2010).

Глава 2. Район и методы исследования

1.1. Характеристика района исследования

Река Енисей является одной из самых длинных и многоводных рек мира, на которой построены крупные водохранилища и высоконапорные плотины (например, Саяно-Шушенское, Майнское и Красноярское водохранилища) (Заделёнов и др., 2008). На р.Енисей в черте города Красноярска, находятся острова, одним из которых является остров Отдыха. Между островом и правым берегом реки располагается наш район исследования – Абаканская протока (координаты: 55.59 с.ш., 92.51 в.д). Русло протоки перекрыто дамбой. Частичное водоснабжение обеспечивается 2 трубами, которые проходят через дамбу. В центре Абаканской протоки после охлаждения паровых турбин происходит выброс до 25000 м³/час подогретых вод (до 25°С) с Красноярской ТЭЦ-2 (Дубровский и др., 2010). Помимо этого, на протоке, в коммерческих целях, располагается садковое хозяйство и в нее поступают ливневые городские стоки (Кравчук и др. 2020).

Работы по отбору проб фитопланктона проводились с мая по август 2021 г. и с июня по август 2022 г на четырёх станциях возле берега со стороны острова Отдыха на глубине 0,4-0,7 м. Станция №1 (речной участок) находилась в начале Абаканской протоки (50 м выше дамбы) и считалась условно фоновой. Станция №2 располагалась в 200 м от дамбы ниже по течению, позволяя обнаружить происходящие изменения в экосистеме в условиях зарегулирования стока. Станция №3 расположена в районе выброса ливневых сточных вод и сброса тёплых вод с ТЭЦ, также на станции имеется искусственная насыпь. Станция №4 была в 500 метрах от садкового хозяйства ниже по течению на территории городского пляжа (рис.1).

В течение вегетационных периодов 2021 и 2022 годов с исследуемого участка р. Енисей собраны основные гидрофизические и гидрохимические показатели, которые могут влиять на видовой состав водорослей.

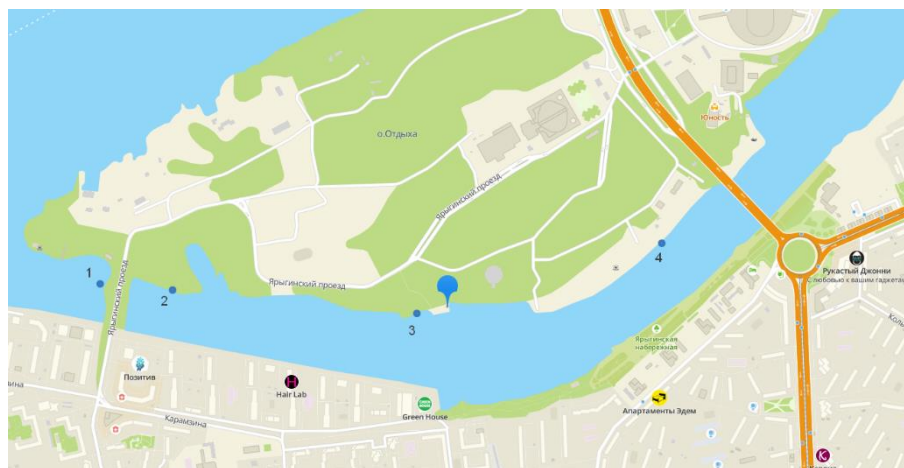


Рисунок 1 – Карта-схема Абаканской протоки р. Енисей: 1-4 - станции отбора проб

Температурный режим воды на станциях Абаканской протоки значительно отличался: самые низкие положительные температуры воды отмечены на речной (фоновой) станции №1 в 2021 г. и на этой же станции а также на станции № 2 – в 2022 г. (табл.1, табл.2).

Таблица 1 – Среднее арифметическое значение (\pm ошибка, $M \pm SE$) гидрохимических, гидрофизических показателей воды на Абаканской протоке р. Енисей в 2021 г. (Жирным шрифтом выделены максимальные значения)

Показатель	Станция №1	Станция №2	Станция №3	Станция №4	P	ПДК
	$M \pm SE$	$M \pm SE$	$M \pm SE$	$M \pm SE$		
NH_4^+ , мг/л	0,132 \pm 0,021	0,143 \pm 0,015	0,157\pm0,017	0,157\pm0,011	>0,05	0,5
NO_2^- , мг/л	0,004 \pm 0,003	0,039 \pm 0,007	0,040 \pm 0,009	0,043\pm0,010	<0,01	0,08
NO_3^- , мг/л	0,737 \pm 0,099	0,733 \pm 0,098	1,013\pm0,066	0,894 \pm 0,101	>0,05	40
P- PO_4^- , мг/л	0,0053\pm0,0004	0,0014 \pm 0,0001	0,0027 \pm 0,0005	0,0025 \pm 0,0004	<0,01	0,05
$P_{общ.}$, мг/л	0,0198 \pm 0,0031	0,0199 \pm 0,0024	0,0260 \pm 0,0013	0,0362\pm0,0071	<0,05	–
O_2 , мг/л	11,65\pm0,34	11,09 \pm 0,57	10,44 \pm 0,52	11,25 \pm 0,56	>0,05	6
pH	7,88 \pm 0,03	8,31\pm0,08	8,21 \pm 0,11	8,21 \pm 0,09	<0,01	8,19
t, °C	12,4 \pm 1,0	19,0 \pm 1,0	20,7\pm1,8	20,0 \pm 1,2	<0,01	20

Высокие температурные показатели были отмечены на станции №3 в 2021 и на станции №4 – в 2022 годах. Высокие температурные показатели на станции №3 объясняются сбросом подогретых вод с ТЭЦ-2, а на станции №4

– по причине низкого уровня воды в этот год и сноса теплой воды со станции №3. Сравнивая два вегетационных периода, можно отметить постоянство температурных показателей воды на всех станциях, кроме станции №2, на которой в 2022 году температура оказалась ниже почти на 7 градусов, чем в 2021 году (табл. 2).

Таблица 2 – Среднее арифметическое значение (\pm ошибка, $M \pm SE$) гидрохимических, гидрофизических показателей воды на Абаканской протоке р. Енисей в 2022 г. (Жирным шрифтом выделены максимальные значения)

Показатель	Станция №1	Станция №2	Станция №3	Станция №4	Р	ПДК
	$M \pm SE$	$M \pm SE$	$M \pm SE$	$M \pm SE$		
NH_4^+ , мг/л	0,113 \pm 0,034	0,095 \pm 0,011	0,119 \pm 0,013	0,12\pm0,008		0,5
NO_2^- , мг/л	0,0045 \pm 0,0005	0,006*	0,0055 \pm 0,0025	0,0078\pm0,0021		0,08
NO_3^- , мг/л	0,768 \pm 0,19	1,07 \pm 0,0682	1,35\pm0,069	1,245 \pm 0,0893		40
$P-PO_4^-$, мг/л	0,0064\pm0,002	0,0053 \pm 0,0007	0,0041 \pm 0,0012	0,0061 \pm 0,0015		0,05
$P_{общ.}$, мг/л	0,0325 \pm 0,01	0,0255 \pm 0,0033	0,0422 \pm 0,014	0,0557\pm0,0147		–
O_2 , мг/л	12,23\pm0,31	10,23 \pm 0,72	11,01 \pm 0,19	9,77 \pm 1,09		6
pH	8,14 \pm 0,2	7,97 \pm 0,08	8,27 \pm 0,09	8,46\pm0,14		8,19
t, °C	12,23 \pm 2,19	12,2 \pm 1,53	18,43 \pm 3,24	20,7\pm1,61		20
* По многим датам концентрация была ниже предела обнаружения						

В результате точечных температурных замеров воды на водозаборных станциях было отмечено, что температура р. Енисей (станция №1), отличается от показателей ниже дамбы (станции №2-4) на 7-9°C.

Известно, что с увеличением содержания кислорода увеличивается интенсивность окислительных процессов (Девяткин и др., 2012). В периоды повышенной инсоляции и температуры интенсивность аэрации благодаря процессам фотосинтеза будет возрастать. Таким образом можно предположить, что по мере повышения температуры воды будет возрастать и роль фитопланктона в формировании кислородного режима водоема, и уровень насыщения воды кислородом в летний период.

Показатели содержания кислорода в 2021 году по станциям относительно одинаковы. Самая низкая концентрация кислорода в воде наблюдалась на станции №1, самая большая – на станции №3 (табл.1). В 2022 году показатели кислорода колебались от 9,77 мг/л (станция №4) до 12,23 (станция №4) (табл.2). Полученные показатели являются нормой при данных температурах (Волкова и др., 2017).

Особую роль в водотоках играет рН воды, изменения которого могут быть связаны с процессами фотосинтеза, превращениями различных форм биогенных элементов, с динамикой токсичных загрязнений и самоочищением воды в целом. В ходе эволюции эволюционного развития у многих организмов выработались адаптации, которые обеспечивают в клетке относительное постоянство рН. Данный показатель является важным, поскольку способен влиять на активность ферментов и состояние других белковых молекул, а также на протекание некоторых неферментативных реакций. Так как большинство реакций в клетках происходит в водной среде, дисбаланс ионов влияет на протекание реакций. Многие водные растения живут в диапазоне рН 6,0 – 8,0. Однако большинство растения способны переносить небольшие отклонения от нейтральной реакции воды без каких-либо последствий (Зиновьева, Дурников, 2012).

В Абаканской протоке в 2021 г. с мая по август среднее значение рН среды изменялось в пределах от 7,88 мг/л (станция №1) до 8,31 мг/л (станция №2), что говорит о слабощелочном характере воды (табл. 1). Тоже можно сказать и о величинах рН в 2022 году, которые оказались не намного выше, в сравнении с предыдущим годом, но остались в рамках градации прошлого года (табл.2). Здесь значения рН изменялись в диапазоне 7,97–8,46 мг/л: самую высокую величину наблюдали в районе городского пляжа (станции №4), а самую низкую – участок ниже дамбы (станция №2).

Среднее значение концентрации аммонийного азота (NH_4^+) в реке (станция №1) и ниже дамбы (№2) практически не отличались, но наблюдалась тенденция увеличения показателя на станциях №3-4, что может

свидетельствовать о влиянии рыб садкового хозяйства. В процессе метаболизма рыбы выделяют эти ионы аммонийного азота. В 2022 году показатель аммонийного азота был ниже на 30-40 единиц. Но также оставался относительно постоянным на всех четырёх станциях и изменялся в диапазоне от 0,095 до 0,12 мг/л. Сравнивая показатели за два года исследования, отмечено самое высокое содержание ионов аммонийного азота на станции №4 (табл.1, табл.2).

Средние концентрации нитритного азота (NO_2^-) в реке и ниже дамбы, после зарегулирования, в течение вегетационного периода значительно отличались друг от друга. В реке концентрация NO_2^- в 2021 году была ниже почти в 10 раз, чем на других станциях после дамбы. В 2022 году концентрация нитритного азота была практически равна показателю на станции №1 в 2021 году. Говоря обо всех станциях, можно сказать, что значения NO_2^- были относительно стабильны на одном уровне, и, сравнивая станции между собой, можно увидеть, что концентрация на станции №4 (0,0078 мг/л) была выше почти в 2 раза, чем на станции №1 (0,0045 мг/л) (табл.1, табл.2).

Средние величины концентраций нитратного азота (NO_3^-) и минерального фосфора (P-PO_4^-) в 2021 году показывают незначительные отличия по станциям (табл.1). То же можно сказать и о фосфоре в 2022 году. Однако в 2022 году содержание нитратного азота увеличивалось от станции №1 (самый низкий показатель), к станции №4. Самое высокое значение концентрации NO_3^- в 2022 году наблюдалось на станции №3 (как и в 2021 г.). Аналогичная ситуация отмечена для величин P-PO_4^- (табл.1, табл.2).

Концентрация фосфатов в воде неравномерно распределена в течение года и подвержена сезонным колебаниям. Эти колебания обусловлены интенсивностью процессов фотосинтеза и биохимического разложения органических веществ. Весной и летом минимальные концентрации соединений фосфора наблюдаются в воде, в то время как в осенний и зимний периоды наблюдаются максимальные значения. По данным 2021 года концентрация общего фосфора находилась в пределах 0,02-0,036 мг/л.

Наибольшее содержание общего фосфора выявлено на станциях №3-4, наименьшее - на станции №1, что говорит о тенденции увеличения концентрации общего фосфора в нижней части Абаканской протоки. По данным 2022 года отмечено небольшое увеличение концентрации общего фосфора, который находился в диапазоне 0,025 – 0,056 мг/л. Увеличение содержания фосфора выявлено на станциях №3-4 и, на этих станциях его содержание в 2022 году было в два раза больше, по сравнению с 2021 годом.

Сравнивая гидрохимические показатели (таблицы 1-2) с ПДК, можно сказать что средние концентрации биогенных элементов не превышали допустимую норму. Была отмечена тенденция понижения аммонийного и нитритного азота, повышения нитратного азота практически в 2 раза на станциях после дамбы. Также повысились концентрации фосфора на станциях 2-4 и снизилась концентрация кислорода на 4 станции на 1,48 мг/л.

2.2. Методы исследования фитопланктона

Отбор проб для определения первичной продукции фитопланктона проводился на глубине примерно 0,5 метров (Руководство по гидробиологическому мониторингу..., 1992). Вода для гидрохимического и гидрологического анализов зачерпывалась пластиковым ведром; температура воды замерялась термометром Long-Stem Thermometer, F/C, 8 (Cole-Parmer, США); содержание кислорода, растворённого в воде – кислородомером HI 9142 (Hanna Instruments, США), pH – с помощью лабораторного pH-метра PB-11 (Sartorius, Германия).

Помимо этого, на каждой станции с помощью регистрирующего устройства LI-COR 1400 (LI-COR Ltd., США) и наземного поверхностного сенсора LI-190 SA производились замеры фотосинтетической активной радиации (ФАР). Также с помощью погружных сенсоров LI-193SA и LI-192SA (LI-COR Ltd., США) производилось измерение подводной освещённости на

поверхности и на глубинах примерно 0,4-0,7 метров (Tolomeev et al., 2014). На данных участках эвфотическая зона достигала дна.

Для определения валовой первичной продукции использовали флуоресцентный метод. Расчёты ВПП фитопланктона были основаны на содержании в пробах хлорофилла *a* и потенциальной фотосинтетической активности водорослей (в том числе и цианобактерий). Чтобы определить фотосинтетическую активность, были проведены измерения флуоресценции при длине волны 685 нм до и после добавления симазина (2-хлор-4,6-бис(этиламино)-с-триазин), который прекращал фотосинтетическую активность в пробе, путём прерывания электрон-транспортной цепи. Измерения проводились в день сбора проб после доставки их в лабораторию на индукционном флуориметре ФЛ-304 (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия). Данная методика основана на работе (Гольд и др., 1984; Gaevsky et al., 2000; Анищенко, 2008).

Для определения пигментов использовали спектрофотометрический анализ, основанный на измерении света, который поглощается с помощью растворов пигментов при определённых длинах волн (Кудрявцев, 1974). Данный метод широко распространён при исследовании продуктивности фитопланктона разнотипных водоёмов. Спектрофотометрический метод включает несколько последовательных этапов (Scor-Unesco Working Group N 17..., 1966):

- 1) Подготовка фильтра путём фильтрации водной суспензии порошкообразного $MgCO_3$ (6 мл) для получение ровного тонкого покрытия;
- 2) Фильтрация известного объёма воды (0,5-5 л в зависимости от предполагаемой концентрации водорослей) через стекловолоконный фильтр, покрытый слоем $MgCO_3$;
- 3) Экстракция фильтров с клетками планктона в этаноле (90%);
- 4) Нагревание экстракта до точки кипения (780С) в закрытом сосуде (необходимо для предотвращения испарения);

- 5) Хранение образца в темноте при низкой температуре 6-24 часа;
- 6) Центрифугирование экстрактов для фиксирования ненужных остатков в нижней части колбы;
- 7) Измерение при 665 нм и 750 нм на правильно отрегулированном спектрофотометре (ширина щели 0,2-0,4 мм) по сравнению с эталонной кюветой, заполненной 90% этанолом.
- 8) Подкисление части экстракта 0,3 мл HCl.
- 9) Повторное измерение через 5-30 минут при 665 и 750 нм.
- 10) Расчёт концентрации хлорофилла по уравнению:

$$C_{\text{хл } a} = 29,6 (E_{665}^b - E_{665}^a) \cdot \frac{v}{V \cdot l} \quad (1)$$

где $C_{\text{хл } a}$ – концентрация хлорофилла (мкг/л); E_{665}^b и E_{665}^a – поглощение света при 665 нм перед (E^b) и после (E^a) подкисления соответственно (оба значения, при необходимости, корректируются на мутность путём вычитания показаний 750 нм и исправляются на ошибки кюветы). v – объем экстракта (как правило, 10 мл). V – объем пробы (обычно 1 л). l – длина светового пути в кювете (в см) (Nusch, 1980).

Далее, согласно методике, представленной в работе (Gaevsky et al., 2000), рассчитана валовая первичная продукция (ВПП) фитопланктона (2), которая выражается в г $O_2/(м^3 \cdot ч)$, отдельно для каждого горизонта:

$$\text{ВПП} = 6,227 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Хл}_a \cdot \Delta\text{Фл}/\text{Фл}_m \cdot \sqrt{I_z}, \quad (2)$$

где $\Delta\text{Фл}/\text{Фл}_m$ – относительная переменная флуоресценция (отн. ед.); Хл_a – концентрация хлорофилла «а» планктона (мг/м³) в пробе, принятая для столба воды; I_z – среднечасовая интенсивность ФАР (Вт/м²) на данном горизонте.

Относительная переменная флуоресценция ($\Delta\text{Фл}/\text{Фл}_m$) была рассчитана по формуле (3):

$$\Delta\Phi_{\text{Л}}/\Phi_{\text{Л}_M} = (\Phi_{\text{Л}_M} - \Phi_{\text{Л}_0})/\Phi_{\text{Л}_M}, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{Л}_0}$ – флуоресценция хлорофилла без добавления ингибитора; $\Phi_{\text{Л}_M}$ – максимальная флуоресценция в присутствии 10 мкМ ингибитора.

$\Phi_{\text{Л}_M}$ и $\Phi_{\text{Л}_0}$ были измерены при возбуждении широкой областью (400–620 нм).

Расчёт среднечасовой интенсивности ФАР (I_z , Вт/м²) проводился по формуле (4):

$$I_z = Q \cdot I_s \cdot e^{-K_0 z}, \quad (4)$$

где z – глубинах горизонта, выраженная в метрах; I_s – средние часовые величины, которые приходят на поверхность ФАР (данные по сумме суточной радиации были взяты с сайта ([https:// power.larc.nasa.gov/data-access-viewer](https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer)), которые в дальнейшем были переведены в Вт/м² с учётом длины светового дня (данные были взяты на сайте <http://dateandtime.info/ru/citysunrisesunset>) (переводной коэффициент Дж в Вт – 1/3600), и, для перевода значения в ФАР, были умножены на коэффициент 0,46 (коэффициент умеренных широт. Значение K_0 (коэффициент ослабления света на глубине z) – результаты подводных измерений ФАР, проводившихся на водоёме с помощью сферического датчика освещенности LI193SA по формуле, представленной в работе (Kirk, 2010).

Во время измерения с помощью сферического датчика, на берегу проводились замеры наземным сенсором LI-190 SA и плоским датчиком (LI-192SA) в верхнем уровне воды. Благодаря этому была произведена оценка интенсивности ФАР. Такие измерения проводились для каждой станции в дни отбора проб. Также в основное уравнение был введён коэффициент Q которые показывал изменение света при переходе из газообразной фазы в жидкую.

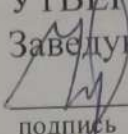
Далее, согласно методике, представленной в работе (Кравчук и др., 2020), для оценки валовой первичной продукции на квадратный метр данные на изученных горизонтах интегрировали по глубине. Далее полученные

данные ВПП были умножены на длину светового дня. Это было необходимо для расчёта ВПП за сутки ($\text{гO}_2/\text{м}^3\text{сут}$).

Для статистической обработки данных в программе R использовали анализ Краскела-Уоллиса (анализ Манна-Уитни), для выяснения различий данных у которых нет нормального распределения. Кроме этого в Excel были рассчитаны величины средней арифметической и ее ошибка, а также критерий Стьюдента.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт фундаментальной биологии и биотехнологии
Кафедра водных и наземных экосистем

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

подпись М.И. Гладышев
« 16 » 06 2023 г.
инициалы, фамилия

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

06.03.01 Биология

Первичная продукция фитопланктона Абаканской протоки реки Енисей

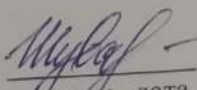
Руководитель


подпись, дата

профессор, д.б.н.
должность, ученая степень

Е. А. Иванова
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

16.06.2023

Д. В. Шуваркова
инициалы, фамилия