МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Анализ формирования сезонной гипоксии в Амурском заливе»

Исполнитель: Зайцева Полина Дмитриевна

Руководитель: к. ф.-м. н., доцент, Ерёмина Татьяна Рэмовна

К защите допускаю»

И.о. заведующего кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025г.

г. Санкт-Петербург

2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ…. 4

ГЛАВА 1. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ 7

1.1. Физико-географическая характеристика Амурского залива……..……7

1.1.1. Общее географическое положение Амурского залива……..7

1.1.2. Формирование береговой зоны……8

1.1.3. Глубины и донные отложения……...……..8

1.2. Северо – западное побережье……...……..9

1.3. Северная часть……11

1.4. Полуостров Де-Фриза……12

1.5. Южная часть……...……13

1.6. Экосистема и биоразнообразие……14

1.7. Гидрометеорологические условия……15

1.8. Циркуляция вод……..16

1.9. Ледовый покров……..17

1.10. Температурный режим……17

1.11. Солевой режим……...……..19

ГЛАВА 2. ГИПОКСИЯ В ВОДАХ МИРОВОГО ОКЕАНА 22

2.1. Причины формирования гипоксии в Амурском заливе 24

2.2. Методы анализа формирования гипоксии 26

2.3. Обзор методики анализа при помощи индекса E-TRIX 28

ГЛАВА 3. ОБЗОР ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ 32

3.1. Обоснование анализа придонного слоя для изучения гипоксии в Амурском заливе 32

3.2. Анализ пространственно-временной изменчивости показателя растворённого кислорода в северной и южной частях Амурского залива 34

3.3. Применение методов анализа эвтрофикации Амурского залива 47

Заключение……..…….57

Список литературы ……..……..……...……..……57

Приложение А……..……..……...……58

Приложение Б……..……....……64

ВВЕДЕНИЕ

Амурский залив в последние десятилетия столкнулся с серьёзной экологической проблемой – нарастающей гипоксией вод. Это явление, характеризующееся критическим снижением содержания растворённого кислорода в морской воде, представляет собой прямую угрозу для всего биологического разнообразия акватории. Проблема гипоксии в Амурском заливе носит комплексный характер и обусловлена сочетанием природных факторов и последствий интенсивной хозяйственной деятельности человека в прибрежной зоне.

Интенсивное освоение прибрежных территорий, рост промышленного производства, расширение портовой инфраструктуры, а также увеличение антропогенной нагрузки, связанной с сельским хозяйством и коммунальным хозяйством Владивостока, способствовали поступлению в залив значительных объёмов биогенных элементов, в частности соединений азота и фосфора.

Этот процесс, известный как эвтрофикация [2], вызывает перенасыщение вод биогенными веществами, что стимулирует массовое развитие фитопланктона и макрофитов. В результате происходит увеличение первичной продукции, а после отмирания органики — её активное разложение бактериями, которое сопровождается резким потреблением растворённого кислорода. В условиях ограниченного водообмена с открытой частью залива Петра Великого это приводит к формированию зон гипоксии и даже аноксии, что негативно сказывается на гидробионтах и биоразнообразии в целом.

Особую серьёзность проблемы вызывает тот факт, что в последние годы участились случаи заморов рыбы и других водных организмов, что

свидетельствует о нарастании экологических проблем в Амурском заливе. При этом сезонная и межгодовая динамика содержания кислорода остаётся недостаточно изученной, что затрудняет прогнозирование экстремальных ситуаций и разработку эффективных природоохранных мер.

Целью работы является анализ данных межгодовой и сезонной изменчивости содержания растворённого кислорода в водах Амурского залива, установление ключевых факторов, приводящих к формированию гипоксии.

Основные задачи исследования:

1. Оценить пространственно-временное распределение концентрации растворённого кислорода в Амурском заливе за последние десятилетия.
2. Выявить взаимосвязь между содержанием кислорода и концентрацией биогенных элементов (азота и фосфора).
3. Проанализировать влияние гидрологических и метеорологических условий на формирование гипоксии.
4. Определить роль антропогенных факторов в деградации кислородного режима залива.
5. Разработать рекомендации по снижению рисков гипоксии и улучшению экологического состояния акватории.

Актуальность работы обусловлена необходимостью комплексного подхода к мониторингу и управлению качеством вод Амурского залива в условиях возрастающей антропогенной нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы для разработки природоохранных мероприятий,

направленных на предотвращение экологических кризисов и сохранение биологического разнообразия этого важного района Японского моря.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования её выводов для совершенствования системы экологического контроля, планирования хозяйственной деятельности на побережье и принятия управленческих решений, направленных на устойчивое развитие региона.

Для проведения анализа изменений концентраций кислорода и биогенных веществ, а также определения периодов формирования и разрушения гипоксии, исходными данными послужили данные гидрохимических определений проб воды из Амурского залива за 2015-2022 гг. (кислород, фосфаты, минеральный азот, растворенный кислород, pH), а также данные профилей показателей, измеренных зондом ASTD-102 Rinko (TS, кислород, хлорофилл a, гидрохимические показатели добавлены на горизонтах отбора проб) в Амурском заливе за 2015-2020 гг.

[…] Мониторинговые работы выполнены в рамках бюджетного финансирования Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» ("ТИНРО") (Зайцева и др., 2022).

ГЛАВА 1. РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Физико-географическая характеристика Амурского залива

1.1.1. Общее географическое положение Амурского залива

Амурский залив, один из крупнейших в северо-западной части Японского моря, играет важную роль в географии и экономике Приморского края. Он омывает берега южного Дальнего Востока России, располагаясь между полуостровом Муравьёва-Амурского, где находится Владивосток, и полуостровом Песчаный на востоке. С юга залив через пролив Босфор Восточный соединяется с Уссурийским заливом и открывается в акваторию Японского моря.

Протяжённость залива составляет около 65 км, а ширина у входа достигает 20 км. Глубины здесь неравномерны: в северной части они не превышают 10–20 метров, тогда как ближе к выходу в море увеличиваются до 50 метров. В Амурский залив впадают несколько рек, среди которых наиболее значительные — Раздольная (Суйфун) и Артёмовка. Их устья образуют мелководные участки с илистыми отложениями, что влияет на экосистему залива.

Береговая линия залива отличается сильной изрезанностью, образуя множество бухт и бухточек. Наиболее известные из них — бухта Золотой Рог, где расположен главный порт Владивостока, а также бухты Диомид и Патрокл. Важную роль в защите акватории от сильных ветров и штормов играют острова: Русский, Попова, Рейнеке и Рикорда, создающие естественный барьер.

1.1.2. Формирование береговой зоны

Береговая зона характеризуется сочетанием двух основных типов морфогенетических процессов. С одной стороны, здесь активно развиваются абразионно-денудационные формы, где под влиянием комплекса факторов выветривания (как физического, так и химического) формируются крутые обрывистые склоны с активными осыпными и обвальными процессами. У их подножий наблюдается накопление слабосортированного обломочного материала с низкой степенью окатанности.

С другой стороны, значительные участки побережья представлены лагунными системами, возникновение которых обусловлено развитием аккумулятивных форм - барьерных кос из песка, гравия и гальки. Эти естественные преграды способствуют образованию изолированных от открытого моря мелководных водоемов со специфическим гидрологическим режимом и осадконакоплением.

1.1.3. Глубины и донные отложения

Донный рельеф Амурского залива отличается относительной выровненностью, однако имеет ряд характерных особенностей. Важным элементом подводного рельефа является подводный порог, протянувшийся в северо-западном направлении от острова Русский к противоположному берегу, с преобладающими глубинами 13-15 метров. Как можно узнать с сайта единой государственной системы информации об обстановке в мировом океана [3], Северная часть Амурского залива характеризуется наименьшими глубинами,

где отмечается скопление каменистых банок. Наибольшая мелководность наблюдается в заливе Угловом, где глубины на фарватерных участках не превышают 2,4-3,6 м. Особенно резкое уменьшение глубин до 2 м и менее фиксируется севернее мыса Раздельный, являющегося восточной оконечностью полуострова Де-Фриза. Гидрографическую сеть залива формируют водотоки различного порядка, среди которых наиболее значимыми являются реки Раздольная (крупнейшая в регионе), Амба, Шмидтовка, Богатая и Пионерская, а также многочисленные ручьи.

Амурский залив характеризуется преимущественно илисто-песчаными донными отложениями, формирующими ровное дно. Однако в прибрежной зоне и акваториях бухт встречаются участки с каменистым дном, связанные с выходами коренных пород и деятельностью волновых процессов. Такое распределение донных осадков отражает сложное взаимодействие гидродинамических факторов и геологического строения прибрежной зоны. В северной части акватории доминируют илистые грунты, тогда как на банках преобладают каменистые субстраты. В отдельных районах отмечается слоистая структура донных отложений, представленная песчаным основанием, перекрытым илистыми наносами. Особый характер грунтов наблюдается в северо-восточном секторе залива вблизи мыса Фирсова, где формируется комплексный тип донных отложений, включающий смесь ила, песка, каменистого материала и ракушечных остатков. В южной части Амурского залива, прилегающей к проливу Босфор Восточный и полуострову Муравьёва-Амурского, преобладают песчано-илистые и каменистые грунты, распределение которых зависит от глубины, гидродинамики и близости к береговой линии.

1.2. Северо – западное побережье

Северо-западное побережье Амурского залива, простирающееся от мыса Брюса до устья реки Раздольная, характеризуется преимущественно низменным рельефом с преобладанием песчаных береговых форм. Данный участок береговой линии интенсивно расчленен долинами многочисленных водотоков и имеет лагунные озера берегового типа. Прибрежные склоны долин и оврагов фрагментарно покрыты древесно-кустарниковой растительностью. В тыловой части береговой зоны расположен горный массив Черные горы, ориентированный субпараллельно береговой линии. Локальные отроги горных структур выходят к морю, формируя скалистые мысы с клифами и каменистыми пляжами.

В районе от мыса Песчаный до устья реки Раздольная характеризуется сложной морфологией и выраженной дифференциацией береговых процессов. Южная часть этого участка включает акваторию Славянского залива с прилегающими бухтами - Круглой, Нерпой и Славянкой, формирующими изрезанную береговую линию. Особый интерес представляет Песчаная бухта, вдающаяся в материк между мысами Чихачева и Атласова. Эта мелководная акватория демонстрирует характерный батиметрический профиль с глубинами 2-6 метров у входа, постепенно уменьшающимися к вершине бухты, где образуются обширные осушки. Привходовая зона бухты осложнена каменистыми отмелями с глубинами 2-2.6 метра, создающими навигационные препятствия.

Береговая зона Песчаной бухты отличается контрастным рельефом. Входные мысы представляют собой возвышенные скалистые обрывы высотой до 30-40 метров, сложенные устойчивыми к абразии породами. К западу от

мысов наблюдается постепенное понижение берегового профиля с переходом к более пологим формам рельефа. Северный берег бухты образован обширной аллювиальной равниной реки Амба, характеризующейся заболоченными участками с обильной травяно-камышовой растительностью. Здесь же прослеживается четкий переход к склону холма высотой 134 метра, покрытого смешанным лесом и кустарниковыми зарослями.

Важной особенностью является выраженное увеличение глубин в северо-восточном направлении по мере приближения к мысу Фирсова, что отражает общую геоморфологическую структуру Амурского залива. Береговые процессы в районе Песчаной бухты демонстрируют сложное взаимодействие абразионных и аккумулятивных факторов, формирующее уникальный комплекс прибрежных ландшафтов с разнообразными биотопами и специфическими гидрологическими условиями.

1.3. Северная часть

Северная часть Амурского залива представляет собой мелководный участок акватории, расположенный между материковым побережьем Приморского края и условной линией, соединяющей устье реки Раздольной с западной оконечностью полуострова Де-Фриза. Этот район характеризуется плавным понижением рельефа от прибрежных холмов к морю, образуя обширную прибрежную равнину, пересечённую многочисленными речными долинами.

Главной гидрографической особенностью северного сектора залива является впадение крупнейшей в регионе реки Раздольной, формирующей обширную дельту с несколькими рукавами. Восточнее расположены устья

менее крупных водотоков - рек Артёмовка, Шмидтовка и Богатая, создающих зоны интенсивного распреснения. Береговая линия здесь отличается плавными очертаниями с чередованием низменных песчаных участков и заболоченных лагун, лишь местами прерываемых невысокими глинистыми обрывами.

Глубины в северной части залива редко превышают 10 метров, постепенно уменьшаясь к вершине залива до 2-4 метров. Особенно мелководен залив Угловой, где глубины на фарватере составляют всего 2,4-3,6 метра. Донный рельеф осложнён многочисленными банками и отмелями, наиболее значительные из которых расположены севернее мыса Раздельный. Полуостров Де-Фриза, выступающий в акваторию залива, служит естественной границей между северным и центральным районами Амурского залива.

Гидрологический режим северной части находится под сильным влиянием материкового стока, особенно в летний период муссонных дождей, когда реки приносят большое количество пресной воды и взвешенных наносов. Это создаёт выраженный градиент солёности от 20-25‰ в приустьевых районах до 32-33‰ в центральной части залива. Зимой мелководные участки северного сектора первыми покрываются льдом, который здесь отличается наибольшей толщиной и устойчивостью.

1.4. Полуостров Де-Фриза

Полуостров Де-Фриза, выступающий от северного побережья Амурского залива, образует юго-западную границу залива Угловой. Этот возвышенный участок суши достигает максимальной отметки 29,6 м в своей северо-восточной части, где преобладает смешанный лесной массив, прерываемый

антропогенными ландшафтами. Береговая линия полуострова демонстрирует выраженный контраст: юго-западное побережье характеризуется крутыми склонами с узкими каменисто-галечными пляжами, тогда как северо-восточная часть имеет более пологий профиль с развитыми песчано-галечными отложениями и обширными осушками.

Геоморфологическим доминантом полуострова является мыс Тихий (высота 20 м), представляющий собой западный входной мыс залива Угловой. Этот обрывистый выступ сложен преимущественно песчаниковыми породами с включениями лигнитовых прослоев. В акватории к юго-западу от мыса расположена частично осыхающая банка Клыкова западная, окруженная обширным мелководным районом с многочисленными банками, многие из которых подвержены осушению.

1.5. Южная часть

Южная часть Амурского залива занимает стратегически важное положение в северо-западной акватории Японского моря, образуя переходную зону между основной частью залива и проливом Босфор Восточный, который соединяет его с Уссурийским заливом. Эта акватория ограничена с севера условной линией от мыса Фирсова до южной оконечности острова Русский, с востока - берегами полуострова Муравьёва-Амурского, где расположен Владивосток, а с запада - островами Русский, Попова и Рейнеке, выполняющими роль естественного барьера против морских штормов. Южной границей служит вход в пролив Босфор Восточный, ведущий к Уссурийскому заливу.

Береговая линия южной части Амурского залива отличается исключительной изрезанностью, образуя множество живописных бухт, среди которых особенно выделяются Золотой Рог, Диомид и Патрокл. Мысы Токаревского, Басаргина и Вятлина, выступающие далеко в море, создают уникальный ландшафт и служат важными навигационными ориентирами. Полуостров Муравьёва-Амурского, обрамляющий восточное побережье, характеризуется гористым рельефом с крутыми обрывами, спускающимися к морю, что придаёт местности особую живописность. Остров Русский, самый крупный в этой акватории, не только защищает залив от открытых морских волн, но и создаёт уникальный микроклимат в прилегающих водах.

Гидрографические особенности южной части залива отличаются значительным разнообразием. Глубины здесь увеличиваются по направлению к проливу Босфор Восточный, достигая 15-50 метров, что обеспечивает удобство судоходства. Однако вблизи берегов, особенно у мысов, встречаются опасные для навигации подводные скалы и каменистые банки. Течения в этой части залива имеют преимущественно приливно-отливный характер со скоростью до 1,5 узлов, что создаёт особый гидрологический режим. Вода отличается высокой прозрачностью, особенно в летний период, когда видимость под водой может достигать 10-15 метров.

1.6. Экосистема и биоразнообразие

Амурский залив богат морской фауной и флорой благодаря своему уникальному гидрологическому режиму и морским течениям. Вода в заливе обычно достаточно теплая, что способствует развитию различных видов рыб и других морских организмов.

Вода Амурского залива изобилует различными видами морских различных видов рыб, ракообразных и морских млекопитающих. Здесь можно встретить много видов китов и дельфинов, что делает эти воды популярными у экологов и исследователей.

1.7. Гидрометеорологические условия

Ветровой режим характеризуется выраженной сезонной изменчивостью. В теплый период (май-август) преобладают ветры южных и юго-восточных румбов, тогда как в холодный сезон (октябрь-март) доминируют северные и северо-западные воздушные потоки. Особую опасность представляют северо-восточные ветры, отличающиеся значительной интенсивностью и сопровождающиеся метелями. В переходные месяцы (апрель, сентябрь) направление ветров отличается повышенной изменчивостью. В летний период (июль-август) четко выражен бризовый режим циркуляции: в дневные часы (с 12:00 до заката) преобладают юго-западные морские бризы.

Туманы распределяются по акватории залива неравномерно. Их повторяемость в Амурском заливе существенно ниже, чем в южных районах залива Петра Великого, при этом северо-западное побережье подвержено туманам в меньшей степени по сравнению с юго-восточным. Среднегодовые показатели туманной активности варьируют от 23 суток в вершине залива до 105 - в южной его части. Максимальная повторяемость туманов отмечается в период с апреля по август, когда их месячная частота колеблется от 2 до 21 дня. В отдельные годы в южном секторе залива в июне-июле может наблюдаться до 29 туманных дней. Для Амурского залива характерно пятнистое распределение туманов: участок между заливом Угловой и мысом

Фирсова отличается меньшей туманностью по сравнению с акваторией, расположенной восточнее - до пролива Босфор-Восточный.

1.8. Циркуляция вод

Амурский залив характеризуется слабоинтенсивными течениями, формирующимися преимущественно под влиянием ветрового воздействия. В северном секторе залива дополнительным фактором выступает речной сток, особенно заметный в районах впадения рек Раздольная и Амба. Приливные течения проявляют незначительную динамику, достигая скорости 1,6 узла лишь в наиболее суженных участках акватории. В штилевых условиях наблюдается пространственная дифференциация течений: во время прилива они выражены вдоль юго-восточного побережья, тогда как в фазу отлива - у северо-западного берега.

Четкая картина течений проявляется только в безветренную погоду, когда в заливе устанавливается циклоническая (против часовой стрелки) циркуляция водных масс. Однако эта схема существенно трансформируется под влиянием трех основных факторов:

- Ветрового воздействия
- Приливо-отливных явлений
- Речного стока (особенно р. Раздольная)

Доминирующую роль играют ветровые течения, которые обуславливают сезонную изменчивость циркуляционных процессов. В зимний период они усиливают антициклонический (по часовой стрелке) круговорот в соседнем Уссурийском заливе, тогда как летом способствуют формированию циклонической циркуляции. Наибольшие скорости течений (до 50 см/с на

поверхности) регистрируются при прохождении циклонов, когда наблюдается сложное взаимодействие всех действующих динамических факторов.

1.9. Ледовый покров

Формирование ледового покрова начинается в северо-восточной мелководной части залива во второй декаде ноября. К концу декабря - началу января наблюдается полное ледообразование, при этом основная акватория покрывается неподвижным (припайным) льдом. Процесс разрушения ледового покрова активизируется в конце марта под воздействием усиливающихся северных ветров, приводящих к взлому и выносу льда. Полное очищение залива ото льда завершается к середине апреля.

1.10. Температурный режим

Сезонная динамика поверхностных температур:

1. Весенний период (апрель-май):

- Диапазон температур 4-14°C с максимальными значениями (13-14°C) в вершинах залива

2. Летний сезон (июнь-август):

- Интенсивный прогрев до 24-26°C в защищенных бухтах
- Градиент температур между прибрежьем (18°C) и открытыми водами (17°C)

3. Осеннее похолодание (сентябрь-ноябрь):

- Понижение до 10-14°C во вторичных заливах, 8-9°C в центральной части акватории

4. Зимний период (декабрь-март):

- Охлаждение водных масс до -1.9...+0°C
- Формирование отрицательных температур на мелководьях
- Сохранение положительных температур (до +1°C) за 50-метровой изобатой

Вертикальная термическая структура:

1. Поверхностный слой (0-20 м): амплитуда сезонных колебаний до 25°C
2. Промежуточный слой (20-50 м): температурные колебания не превышают 3°C
3. Глубинные воды (>70 м): практически постоянный термический режим, минимальное сезонное влияние

Термические характеристики Амурского залива в целом на 1-2°C превышают показатели соседнего Уссурийского залива, что обусловлено особенностями циркуляции водных масс и ветрового режима. Наибольшие горизонтальные градиенты температуры наблюдаются в весенне-летний период, когда формируются выраженные термические фронты между прогретыми прибрежными водами и более холодными открытыми акваториями.

Вертикальное распределение температуры демонстрирует выраженную сезонную динамику. В период с апреля по ноябрь наблюдается классическое монотонное понижение температуры с глубиной, характерное для термически стратифицированных вод. В этот период на подповерхностных горизонтах (15-30 м) формируется устойчивый сезонный термоклин, за исключением мелководных участков, где активное ветровое перемешивание обеспечивает

равномерный прогрев всей водной толщи. С наступлением осенне-зимнего периода (с конца октября) под влиянием муссонной циркуляции и интенсивного охлаждения поверхностных вод происходит подъем холодных глубинных масс, приводящий к образованию вторичного термоклина на горизонте около 40 метров. К декабрю конвективные процессы полностью разрушают слои скачка температуры, устанавливая гомотермию (0...-1.9°C) во всей водной толще, которая сохраняется до марта включительно.

1.11. Солевой режим

Особенности солевого режима северной части Амурского залива характеризуются выраженным пространственным градиентом. Минимальные значения поверхностной солености (около 28‰) регистрируются в вершине залива, что обусловлено:

1) Интенсивным материковым стоком (преимущественно реки Раздольная)

2) Ограниченным водообменом с открытой частью залива

3) Эффектом сезонного распреснения в период летних паводков

По мере удаления от устьевых участков рек наблюдается постепенное увеличение солености до характерных для Японского моря значений (32-34‰), с формированием четкого галоклина на промежуточных глубинах. Зимой усиление вертикальной конвекции способствует выравниванию солевого профиля по вертикали.

Сезонная динамика солёности в Амурском заливе демонстрирует чёткую зависимость от климатических факторов и материкового стока. В летний период поверхностные воды подвергаются интенсивному распреснению,

особенно в приустьевых районах, где солёность может снижаться до 20‰. Этот процесс обусловлен сочетанием нескольких факторов: значительным увеличением речного стока в период летних муссонных дождей, формированием устойчивых стоковых течений и ограниченным водообменом с открытой частью залива. В прибрежной зоне и вторичных заливах солёность обычно не превышает 32,5‰, тогда как в центральных районах залива она возрастает до 33,5‰, создавая выраженный горизонтальный градиент.

Осенний переходный период сохраняет распределение солёности, сходное с весенним, однако по мере уменьшения речного стока наблюдается постепенное увеличение значений. Зимой, когда влияние материкового стока минимально, а процессы вертикальной конвекции достигают максимума, устанавливается практически однородный солевой режим с солёностью около 34‰ по всей акватории залива. В глубинных слоях (ниже 50 метров) солёность остаётся стабильной в течение всего года, колеблясь в узком диапазоне 33,5-34,0‰.

Особый интерес представляют процессы, происходящие в придонном слое в зимний период. При образовании морского льда происходит выделение солевого рассола, что приводит к формированию высокоплотных водных масс с температурой ниже -1,5°C и солёностью 34,2-34,7‰. В особенно холодные зимы эти плотные воды, обладая значительным удельным весом, распространяются вдоль дна, достигают шельфовой кромки и, скатываясь по материковому склону, участвуют в вентиляции глубоководных слоёв Японского моря. Этот механизм играет ключевую роль в обновлении придонных водных масс и поддержании кислородного режима не только в пределах Амурского залива, но и в прилегающих акваториях. Вертикальное

распределение солёности в течение года претерпевает значительные изменения: если в тёплый сезон наблюдается чёткое уменьшение значений с глубиной, то зимой, благодаря интенсивному перемешиванию, устанавливается практически однородный профиль по всей водной толще.

Амурский залив играет важную роль в экономике и сфере рыболовства региона. Местные жители зависят от морских ресурсов, которые обеспечивают им рабочие места и продовольственную безопасность.

В целом, физико-географическое положение Амурского залива делает его уникальным и важным регионом для природы, экономики и населения окружающих территорий. Его биоразнообразие, климат и гидрологические особенности делают его объектом интереса для исследований и охраны окружающей среды.

ГЛАВА 2. ГИПОКСИЯ В ВОДАХ МИРОВОГО ОКЕАНА

Современные исследования показывают, что проблема гипоксии в водах Мирового океана становится все более серьезной. Гипоксия, или кислородное истощение, возникает, когда содержание кислорода в воде снижается до опасно низких уровней, недостаточных для жизни многих морских организмов.

Гипоксия имеет разрушительное воздействие на морскую жизнь. Многие виды рыб, морских беспозвоночных и растений не могут выжить в условиях низкого содержания кислорода в воде. Это может привести к снижению биоразнообразия и деградации экосистем океана.

Изменение климата играет значительную роль в увеличении зон гипоксии в океанах. Как показано в исследовании [1], существует чёткая связь между климатическими колебаниями и изменением кислородного режима морских вод. Они приводят к повышению температуры воды, изменению циркуляции океанских течений, а также увеличению воздействия экстремальных погодных явлений, таких как ураганы и циклоны.

Возможные причины развития гипоксии в Мировом океане:

1. Повышение температуры воды.

   Повышение температуры воды океана приводит к уменьшению ее способности удерживать кислород. Теплые воды содержат меньше кислорода, что способствует формированию зон гипоксии. Высокие температуры также стимулируют разложение органического материала на дне моря, что дополнительно уменьшает концентрацию кислорода в воде.

2. Изменение циркуляции течений.

   Изменение циркуляции океанских течений также может способствовать увеличению зон гипоксии. Это связано с перемещением богатых кислородом водных масс и снижением поступления свежей кислородородородной воды в области, где это необходимо для поддержания биоразнообразия и уровня кислорода.

3. Экстремальные погодные явления

   Экстремальные погодные явления, такие как ураганы и циклоны, могут вызывать перемешивание глубоких слоев океана с поверхностными. Это может привести к образованию обширных зон гипоксии, так как глубинные воды, бедные кислородом, перемешиваются с поверхностными слоями.

Изменение климата существенно влияет на распространение гипоксии в океанах, что создает угрозу для морской жизни и морских экосистем. Для смягчения этих негативных последствий необходимо принимать меры по сокращению выбросов парниковых газов и улучшению управления ресурсами океана. Только при глобальных усилиях можно добиться снижения уровня гипоксии в водах океанов и сохранения их богатой биологической разнообразности.

К ключевым негативным последствиям гипоксии относятся: массовая гибель гидробионтов, сокращение видового разнообразия водных сообществ, нарушение биохимического баланса водной среды, а также снижение pH природных вод. Эти процессы ведут к деградации морских экосистем и утрате их продуктивности.

2.1. Причины формирования гипоксии в Амурском заливе

Основной причиной развития гипоксических явлений в заливе стал процесс эвтрофикации – перенасыщения вод биогенными элементами, прежде всего соединениями азота и фосфора. Эти вещества поступают в акваторию через речной сток (особенно из реки Раздольная), со сточными водами населённых пунктов, а также с сельскохозяйственными стоками. Попадая в морскую среду, биогены выступают катализаторами бурного роста фитопланктона и водорослей, что приводит к целому каскаду негативных последствий. После отмирания эта органическая масса опускается на дно, где в процессе разложения активно потребляется кислород. В условиях ограниченного водообмена с открытой частью залива Петра Великого это приводит к формированию устойчивых зон с пониженным содержанием кислорода, а в наиболее тяжёлых случаях – к появлению так называемых "мёртвых зон", полностью лишённых кислорода.

Особую остроту проблеме придают уникальные физико-географические особенности Амурского залива. Его северная часть отличается малыми глубинами (2-6 метров) и сложным рельефом дна с многочисленными каменистыми банками и илистыми отмелями. Именно эти мелководные районы наиболее подвержены гипоксическим явлениям. Южная часть залива более глубокая, с максимальными глубинами до 50 метров, где выделяется характерный подводный порог с глубинами 13-15 метров. Такая морфология дна существенно влияет на процессы водообмена и вертикального перемешивания водных масс, создавая предпосылки для формирования устойчивой стратификации.

Гидрологический режим Амурского залива характеризуется слабыми течениями (до 1,6 узла в узкостях) с преобладанием циклонической циркуляции. Значительное влияние на гидрологию оказывает сток реки Раздольная и других менее крупных водотоков. Важной особенностью является сезонная изменчивость циркуляционных процессов: летом усиливается циклоническая циркуляция, тогда как зимой наблюдается тенденция к антициклоническому движению водных масс. Эти особенности циркуляции во многом определяют пространственное распределение гипоксических явлений в акватории.

Термический режим залива отличается ярко выраженной сезонностью. Летом мелководные участки прогреваются до 24-26°C, тогда как зимой наблюдается охлаждение до -1,9°C с образованием ледового покрова. В период с апреля по ноябрь формируется чётко выраженный сезонный термоклин, который создаёт дополнительный барьер для вертикального перемешивания водных масс. Именно в этот период создаются наиболее благоприятные условия для развития гипоксии.

Солёностные характеристики вод Амурского залива демонстрируют значительное пространственное и временное разнообразие. Северная часть акватории подвергается сильному распреснению (до 20‰ летом) за счёт речного стока, тогда как в южной части солёность достигает 33,5‰. Зимой происходит осолонение придонных вод до 34,7‰ в результате процессов льдообразования. Такие градиенты солёности создают дополнительные предпосылки для стратификации водной толщи и ухудшения кислородного режима в глубинных слоях.

Антропогенное воздействие на экосистему Амурского залива проявляется по нескольким направлениям. Помимо уже упомянутого поступления биогенных элементов, значительное влияние оказывает изменение береговой линии – уничтожение природных фильтров (макрофитов), увеличение мутности вод, нарушение естественных процессов самоочищения. Существенный вклад в ухудшение экологической ситуации вносит и рыболовный пресс, который приводит к изменению структуры биоценозов, нарушению трофических цепей и накоплению органического детрита.

Последствия гипоксии для экосистемы Амурского залива носят многообразный и крайне негативный характер. Наиболее очевидным проявлением является массовая гибель донных организмов, которые не способны выжить в условиях кислородного голодания. Это приводит к резкому сокращению биоразнообразия и изменению видового состава сообществ. В долгосрочной перспективе наблюдается перестройка трофических сетей, появление инвазивных видов и общее снижение продуктивности экосистемы. Особую тревогу вызывает формирование обширных "мёртвых зон", где полностью отсутствуют условия для существования аэробных организмов.

2.2. Методы анализа формирования гипоксии

Для анализа гипоксии в Амурском заливе применяются различные методики и подходы, которые позволяют оценить уровень кислородного содержания в водах и выявить причины возникновения этого явления. Важно

понимать, что точное измерение гипоксии требует совместного использования нескольких методов для получения комплексной картины.

В летний сезон выполнялись комплексные исследования акватории Амурского залива, в которых наряду с CTD-зондированием в придонном и поверхностном слое измерялась концентрация кислорода, биогенных веществ, хлорофилла-а, pH.

Учитывая данные по концентрации кислорода были построены карты пространственного распределения растворённого кислорода в поверхностном и придонном слое за сезон формирования гипоксии (июнь-сентябрь), что дало визуальное подтверждение наличия, местами критического, уровня гипоксии.

Результаты с придонного слоя имеют как общие черты, за рассматриваемые года, так и отличия, что заметно также в исследованиях за прошлые года (Тищенко и др., 2019). Одной из важнейших особенностей распределения кислорода в придонном слое, является наличие гипоксии в центральной впадине. Из чего следует вывод, что там происходит интенсивное потребление кислорода для окисления органического вещества.

Также, как и все прибрежные зоны, это динамично меняющаяся область, требующая постоянных наблюдений и активной работы. И как многие прибрежные регионы, нуждается в индивидуальном подходе, в нахождении методик, по обработке полученных данных.

Причиной эвтрофирования водоёмов является избыточное поступление в них органических и минеральных веществ, прим азота и фосфора, главным источником для которых являются жизнедеятельность человека и речной сток [5]. Для её исследования существует несколько методик, в данной работе производится анализ данных, при помощи, индекс E-TRIX, являющегося

способом определения концентрации биогенных веществ в водах Амурского залива.

2.3. Обзор методики анализа при помощи индекса E-TRIX

Формирование гипоксии в заливе представляет собой комплексный биогеохимический процесс, основу которого составляет микробное окисление избыточной фитопланктонной биомассы в придонных слоях. Этот процесс активизируется в условиях дефицита фотосинтетически активной радиации и при наличии даунвеллинговой циркуляции, способствующей аккумуляции органического вещества в глубинных горизонтах. Первичной причиной накопления избыточной фитопланктонной биомассы выступает эвтрофикация - антропогенное обогащение водной среды биогенными элементами, преимущественно соединениями азота и фосфора, а также органическими веществами. Данное явление провоцирует интенсивное развитие фитопланктона, что приводит к существенным нарушениям в структуре и функционировании водных экосистем.

Экологические последствия проявляются в виде глубоких трансформаций гидробиоценозов, включая изменение видового состава, нарушение трофических связей и ухудшение качества воды относительно установленных нормативных показателей. Динамика процесса характеризуется выраженной сезонной цикличностью, связанной с колебаниями биологической продуктивности, а также кумулятивным эффектом при хроническом поступлении биогенных элементов. Особенностью является нелинейная зависимость между концентрацией биогенов и степенью развития гипоксии,

что обусловлено сложным взаимодействием физических, химических и биологических факторов.

Ключевыми индикаторами процесса служат: снижение концентрации растворенного кислорода в придонных слоях, изменение соотношения азота и фосфора в водной толще, интенсивность седиментации органического материала и трансформация структуры донных биоценозов. Указанные изменения носят долгосрочный характер и приводят к устойчивой деградации морских экосистем, что особенно ярко проявляется в полузамкнутых акваториях с ограниченным водообменом.

На сегодняшний день отсутствует единый универсальный подход к оценке уровня эвтрофикации (трофности) морских вод, равно как и не выработаны общепринятые методические решения, применяемые на практике. Исследования в этой области характеризуются преобладанием субъективных авторских методик, что проявляется в произвольном выборе показателей и их количестве при расчетах различных экологических индексов. Основное ограничение существующих оценочных методов связано с необходимостью учета широкого спектра гидрохимических и биологических параметров морской среды.

Среди множества предлагаемых подходов особого внимания заслуживает расчетный индекс E-TRIX, который рекомендован для научных исследований и включен в программы государственного мониторинга состояния окружающей среды в морских акваториях Европейского Союза. Особенно широкое применение данный индекс получил в рамках Хельсинкской комиссии (ХЕЛКОМ), где доказал свою эффективность для комплексной оценки трофического статуса морских экосистем. Важно

отметить, что даже этот относительно универсальный инструмент требует адаптации к конкретным гидрологическим и экологическим условиям исследуемого водоема.

Индекс E-TRIX оценивает многолетнюю изменчивость уровня эвтрофикации (трофности) и качества морских вод. Он является функцией концентраций общего фосфора, минеральных форм азота, растворенного кислорода и хлорофилла «а». Последний показатель характеризует наличную биомассу фитопланктона. Согласно [Vollenveider et al 1998], индекс эвтрофикации определяется по формуле:

$$E\text{-}TRIX = (\lg[Ch \cdot D\%O \cdot N \cdot P] + 1{,}5)/1{,}2$$

где Ch – концентрация хлорофилла «а», мкг/л; D%O – отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100 % насыщения, N – концентрация растворенных форм минерального азота, мкг/л, P – концентрация фосфора, мкг/л.

Таблица 2.1 - Оценка категории трофности и состояния качества вод

Значение E-TRIX	Уровень трофности	Качество вод	Характеристика качества вод
< 4	Низкий	Высокое	Высокая прозрачность вод, отсутствие аномалий цвета воды, отсутствие пресыщения и недосыщения растворенного кислорода.
4 - 5	Средний	Хорошее	Эпизодические случаи

			уменьшения прозрачности вод, аномалий цвета воды, гипоксии придонных вод.
5 - 6	Высокий	Посредственное	Низкая прозрачность вод, аномалии цвета воды, гипоксия придонных вод и эпизодические случаи аноксии.
> 6	Очень высокий	Плохое	Высокая мутность вод, обширные аномалии цвета воды, регулярная гипоксия на больших пространствах и частая аноксия придонных вод, гибель бентосных организмов.

ГЛАВА 3. ОБЗОР ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1. Обоснование анализа придонного слоя для изучения гипоксии в Амурском заливе

Гипоксия – ключевая проблема Амурского залива, особенно в придонных горизонтах. Этот слой является индикатором экологического состояния водоёма, поскольку здесь аккумулируются процессы, ведущие к дефициту O_2 . Существует несколько факторов, способствующих развитию гипоксии именно в этой зоне.

Гидрологические условия Амурского залива, характеризуется сезонной стратификацией, особенно выраженной в тёплый период (май–сентябрь):

- **Термоклин** разделяет верхний прогревшийся слой и холодные придонные воды, препятствуя конвективному перемешиванию.
- **Галоклин** усиливается за счёт речного стока (р. Раздольная), создавая барьер для диффузии кислорода в глубину.
- **Пикноклин** дополнительно стабилизирует расслоение, способствуя застою придонных вод.

Таким образом, кислород, продуцируемый в фотической зоне, не достигает дна, что приводит к его дефициту в придонном слое.

Также, важным фактором является биохимическое потребление кислорода, придонная зона – это зона седиментации органики, а это основная причина гипоксии. Многочисленные речные и городские стоки Владивостока оседают на дне, увеличивая БПК, отмерший фитопланктон после обильного цветения разлагается бактериями, что дополнительно расходует кислород.

Накопленная за десятилетия органика (сапропель) служит долговременным резервом для разложения.

Разложение органики происходит в несколько стадий с участием разных групп микроорганизмов:

- Аэробное окисление [3]:

Бактерии (например, Pseudomonas, Bacillus) окисляют органику по схеме:

C6H12O6+6O2→6CO2+6H2O+энергия.C6H12O6+6O2→6CO2+6H2O+энергия

- Денитрификация [4]:

$$5CH2O+4NO3^{-}\rightarrow 2N2+4HCO3^{-}+CO2+3H2O$$

- Сульфатредукция [5] (например, Desulfovibrio):

$$2CH2O+SO42^{-}\rightarrow H2S+2HCO3^{-}$$

Мы наблюдаем образование побочных продуктов в следствии анаэробных процессов. Это токсичные соединения - сероводород (H_2S), метан (CH_4) и аммиак (NH_3). Они не только усугубляют гипоксию, но и оказывают комплексное воздействие на экосистему.

H_2S — главный токсин, напрямую убивающий организмы и блокирующий окислительные процессы.

CH_4 — усугубляет гипоксию через окисление и нарушает стабильность донных отложений.

NH_3 — поддерживает эвтрофикацию, косвенно продлевая гипоксию.

Органические вещества поступают преимущественно из коммунальных сточных вод, приносящихся из рек Раздольная и Артёмовка (особенно в период паводков).

Речной сток также является основным путём поступления N и P в залив. Основные формы загрязнения из коммунальных, промышленных и сельскохозяйственных сточных вод: азот – мочевина, аммоний (NH_4^+) из бытовых стоков, фосфор – полифосфаты из моющих средств (до 30% от общего P).

Помимо этого, Амурский залив окружен породами, содержащими апатит (источник P) и глинистые минералы (адсорбируют NH_4^+), а в подземном стоке замечен менее изученный, но потенциально значимый источник, особенно в районах карстовых отложений. Можно также отметить результаты продуктов жизнедеятельности гидробионтов: фитопланктон и макроводоросли в процессе отмирания оседают на дно, поставляя органические формы N и P, зоопланктон и рыбы выделяют биогены в виде экскрементов (мочевина, аммоний, фосфаты).

Не стоит забывать про судоходство и портовую деятельность. Балластные воды содержат остатки биогенов из других акваторий, а донные осадки при дноуглубительных работах ресуспендируются на старые отложения, богатые N и P.

3.2. Анализ пространственно-временной изменчивости показателя растворённого кислорода в северной и южной частях Амурского залива

Из предоставленных данных профилей, северной и южной части Амурского залива, за период 2015-2020 года, были построены карты распределения растворённого кислорода в придонном слое [приложение А].

Его содержание демонстрирует выраженную сезонную динамику. С течением летнего сезона, значения постепенно уменьшаются.

Май – начало устойчивого снижения содержания кислорода в Амурском заливе. Наиболее выраженное падение приходится именно на конец весны начало лета, когда формируются необходимые условия для сезонной гипоксии. В среднем, температура поверхности начинает прогреваться до 8-12°С, а дно до 4-6°С, что приводит к образованию небольшого термоклина. Содержание кислорода в верхнем слое ещё сохраняется в приемлемых пределах (6-8 мг/л), из-за насыщения за счёт фотосинтеза, а вот в придонном постепенно снижается. Также биологические процессы вносят свой вклад, на эту пору приходится начало весеннего цветение фитопланктона, например, диатомовых водорослей, что способствует увеличению первичной продукции, но органическое вещество пока ещё несильно накапливается.

На июнь приходится усиление стратификации и обнаруживаются первые признаки гипоксии. Поверхностный слой прогревается до 14-18°С, придонные воды остаются холодными (6-8°С), термоклин становится более выраженным, блокирует перемешивание, усиливается плотностная стратификация. Благодаря фотосинтезу, поверхностные воды близки к насыщению по концентрации растворённого кислорода, а вот в придонных появляются первый признаки гипоксии, местами, показатели снижаются до 2-3 мг/л. В областях пониженного рельефа, впадин, значения достигают критических значений дефицита <2 мл/л, как например, в июне 2018 года. Такое резкое ухудшение обстановки обуславливается началом массового цветения водорослей, а следовательно, последующим их отмиранием и разложением. Также полностью минимизируется вертикальное перемещение вод из-за

изменения гидрологических условий, что приводит к полной изоляции придонные воды, накоплению продуктов разложения и формированию застойной зоны.

Июль-август являются пиковыми для гипоксии. Максимальная стратификация из-за разницы температурных режимов, в поверхности это 18-22°C, на дне 8-10°C. Состояние кислородного режима в тяжёлой гипоксии, что можно увидеть на примерах июля 2017 и 2018 годов, где в южной части залива зафиксированы точки со значениями 1.69 мг/л и 1.49 мг/л. С течением месяца состояние не меняется, а может даже усиливаться, как видно на примере августа 2019, где зафиксировано 2 критические точки с результатами 1.17 мг/л и 1.25 мг/л. Также накопившаяся органика приводит к активному бактериальному разложению. Всё это приводит к формированию «мёртвых зон» с массовой гибелью бентоса, которые, по некоторым данным, занимают до 30-40% площади дна в этот период.

Как правило, в сентябре гипоксия ослабевает, за счёт охлаждения вод. Поверхность воды остывает, к тому же, усиливается ветровое перемешивание. Цветение водорослей затухает, поступление органики снижается. Гипоксия, в большинстве рассматриваемых случаев, сохраняется, но по сравнению с августом менее выражена. Исключением стал сентябрь 2018, в котором зафиксировано самое низкое значение концентрации растворённого кислорода – 1.1 мг/л.

Для визуализации информации были построены графики межсезонной зависимости концентрации растворённого кислорода, в придонном слое, от температуры, солёности, фосфатов и нитратов, чтобы продемонстрировать зависимость показателя от сезонности изменения. Была выбрана точка с

критически низким показателем кислорода в разгар сезона гипоксии в 2017 году в северной и южной части Амурского залива.

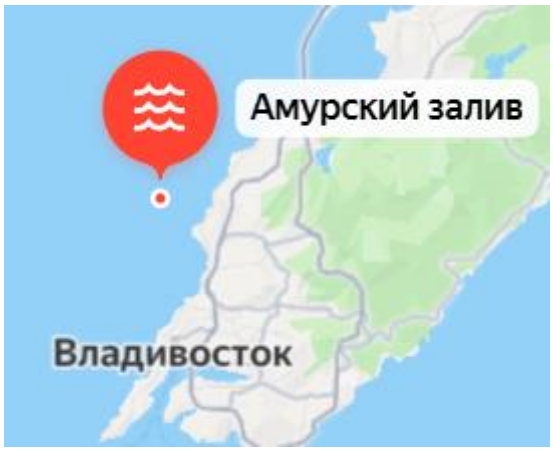

Рис. 3.1. Расположение анализируемой точки северной части Амурского залива

Точка расположена в северо-западной части Амурского залива (43.185210° с.ш., 131.877° в.д.), примерно в 5–7 км к юго-западу от центра Владивостока. Это зона повышенного риска гипоксии из-за сочетания природных и антропогенных факторов. Участок мелководный (20м.), что усиливает прогрев воды летом и снижает растворимость кислорода, полузакрытая бухта замедляет циркуляцию воды.

Присутствует также сильная антропогенная нагрузка, точка находится под влиянием городских стоков, высокие риски к загрязнению нефтепродуктами из-за близости к порту Восточный.

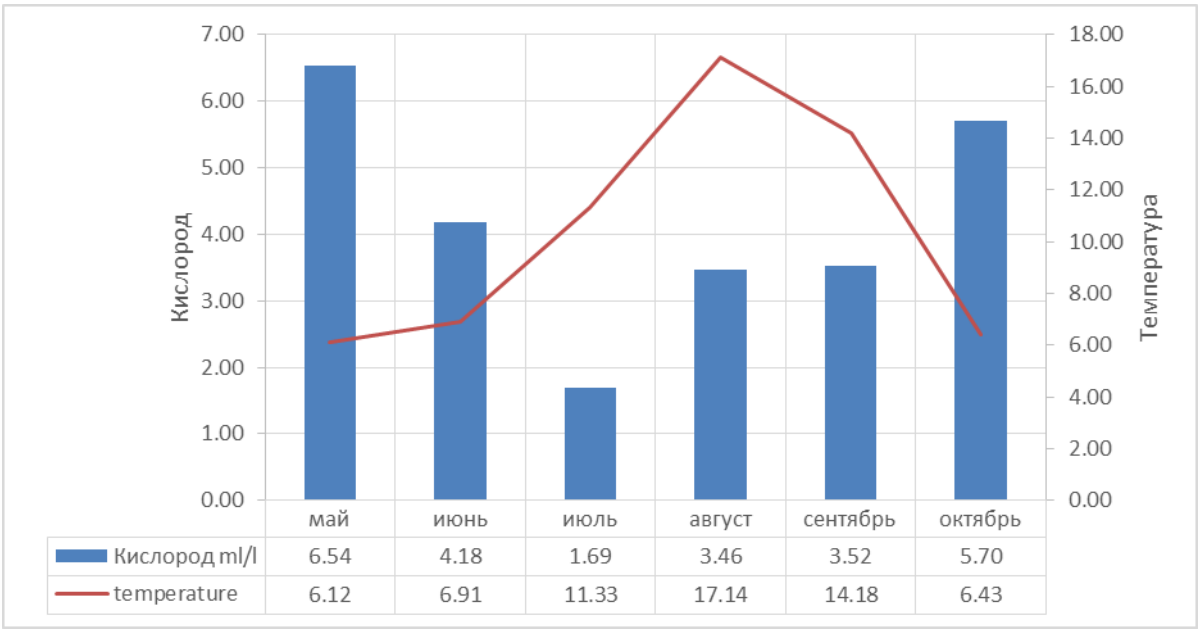

Рис. 3.2. График зависимости концентрации растворённого кислорода от температуры

Данные охватывают несколько месяцев и показывают неоднозначную связь между рассматриваемыми параметрами.

В более холодные месяцы концентрация кислорода выше, несмотря на низкие температуры. А в августе и сентябре при росте температуры кислород снижается, что соответствует закономерности: растворимость кислорода в воде уменьшается с повышением температуры. В октябре температура падает (6.43 °C), но кислород резко возрастает (5.70 мг/л), что может быть связано с сезонными изменениями (например, ветровым перемешиванием воды или увеличением фотосинтеза).

В июле при температуре 11.33 °C кислород достигает минимума (1.69 мг/л), что противоречит общему тренду. Возможные причины: загрязнение воды (например, органическое разложение), стратификация воды (застой глубинных слоёв с низким содержанием кислорода).

Наблюдается статистически значимая зависимость (|r|>0.8), подтверждающая, что прогрев воды является одним из ключевых факторов гипоксии в Амурском заливе.

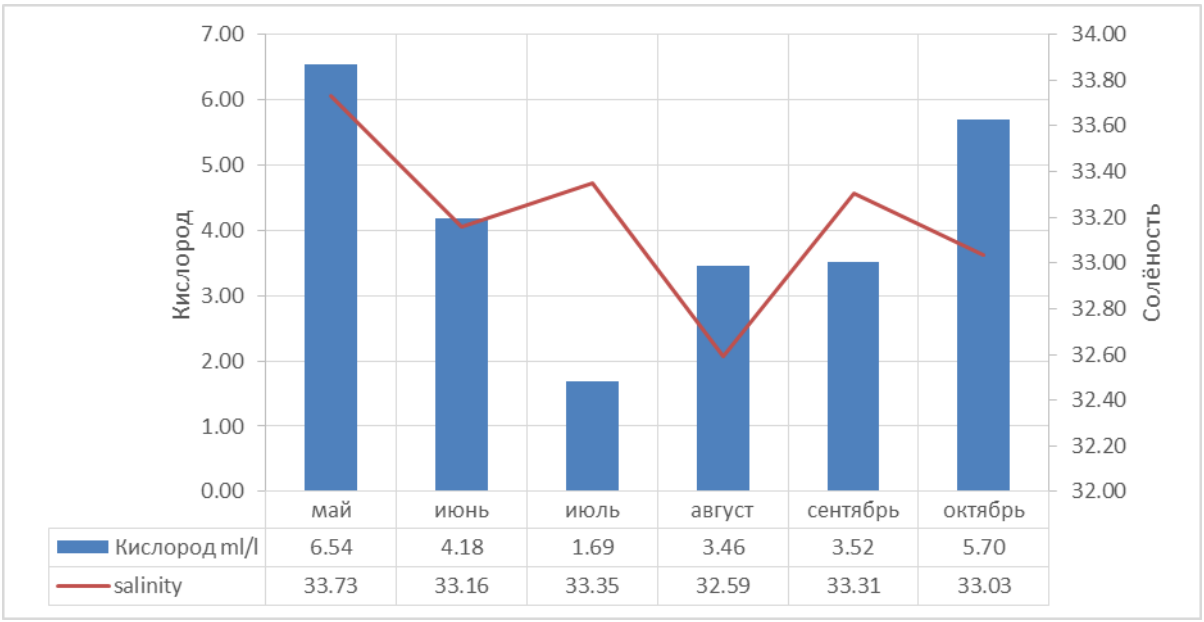

Рис. 3.3. График зависимости концентрации растворённого кислорода от солёности

При анализе зависимости концентрации кислорода от солёности, Наблюдается отсутствие значимой линейной зависимости (|r|<0.3) между солёностью и концентрацией кислорода в Амурском заливе.

Точка за май резко выделяется на фоне остальных, что может указывать на ошибку в данных или уникальные условия измерения.

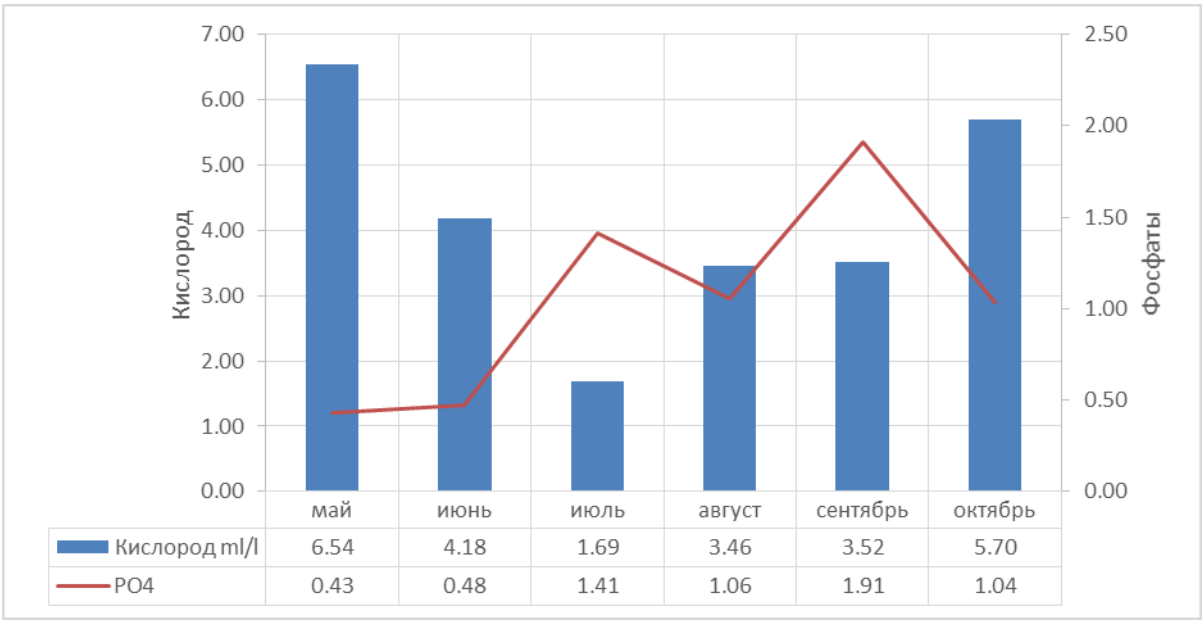

Рис. 3.4. График зависимости концентрации растворённого кислорода от фосфатов

На представленном графике также обнаружена статистически значимая сильная отрицательная зависимость ($|r|>0.9$) между содержанием фосфатов и концентрацией кислорода. Это типично для эвтрофированных водоёмов, где избыток фосфора стимулирует рост органики, что приводит к дефициту кислорода.

При низких концентрациях фосфатов кислород максимален. При росте первого, показатели второго снижаются и наоборот.

Также наблюдаем критические уровни, концентрация фосфатов > 1 мг/л совпадает с O_2 < 3.5 мг/л – это представляет опасность для большинства рыб и беспозвоночных. Так как для фосфатов это уровень при котором начинается неконтролируемое цветение, а для кислорода минимальный порог для выживания большинства рыб [4].

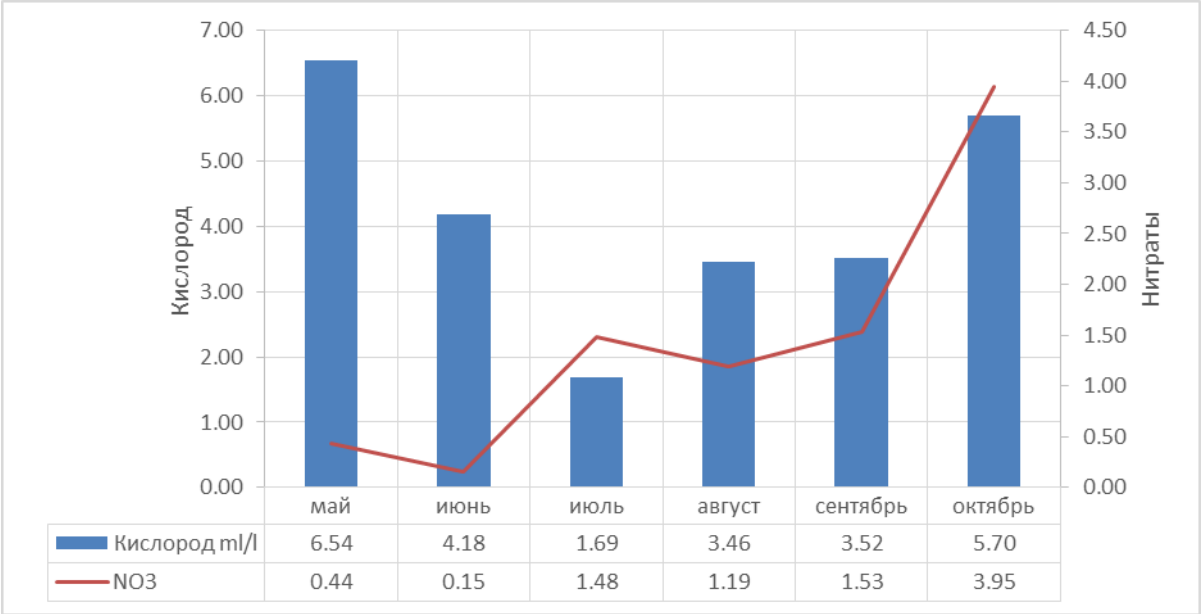

Рис. 3.5. График зависимости концентрации растворённого кислорода от нитратов

На графике заметно отсутствие значимой линейной зависимости ($|r|<0.3$) между нитратами и кислородом.

В октябре зафиксированы высокие значения нитратов (3.95 мг/л) при относительно высоком кислороде (5.70 мл/л). Это может быть связано с: осенним перемешиванием водных масс, поступлением нитратов с речным стоком после дождей.

В июле и августе низкий кислород (1.69–3.46 мл/л) совпадает с умеренным содержанием нитратов (1.19–1.53 мг/л), но это, скорее, связано с температурной стратификацией, а не с влиянием NO_3 .

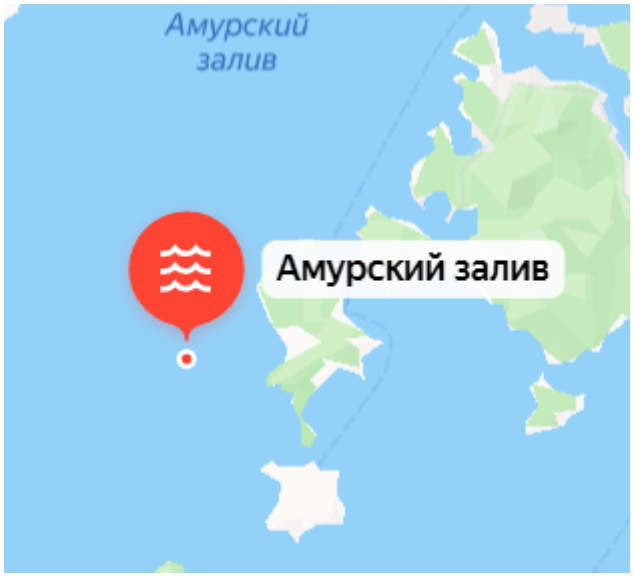

Рис. 3.6. Расположение анализируемой точки южной части Амурского залива

Указанные точка располагается в акватории Амурского залива в северо-западной части Японского моря (42.95647° с.ш., 131.67709° в.д.), примерно в 10 км к юго-западу от Владивостока. Ближайший крупный населённый пункт – город Артём.

С гидрологической точки зрения этот район характеризуется умеренными глубинами в пределах 15-25 метров, что типично для центральной части Амурского залива. Рельеф дна здесь преимущественно ровный, с постепенным увеличением глубины в южном направлении. Донные отложения представлены тонкодисперсными илами с примесью песка, что способствует аккумуляции органического вещества и создаёт предпосылки для развития гипоксических явлений в тёплый период года. Особенностью гидрологического режима является слабая водообменность, обусловленная полузакрытой конфигурацией залива и ограниченным влиянием открытоморских течений.

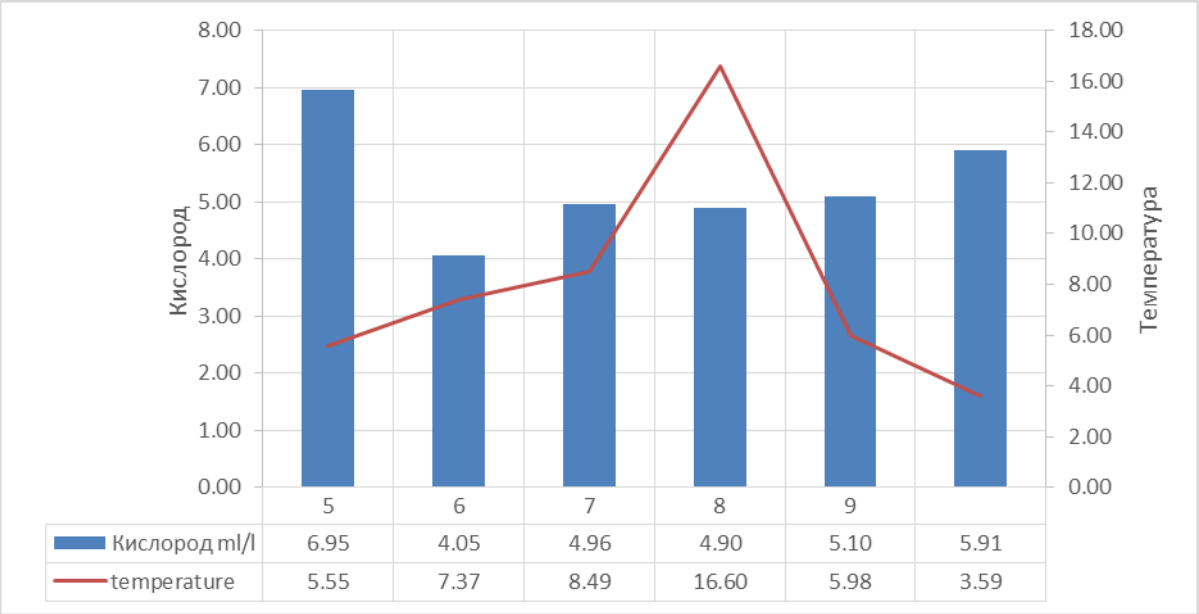

Рис. 3.7. График зависимости концентрации растворённого кислорода от температуры

На представленном графике изображена взаимосвязь между концентрацией растворённого кислорода и температурой воды. Коэффициент корреляции составил -0,40, что указывает на умеренную отрицательную связь между показателями. Это означает, что с повышением температуры воды содержание кислорода в ней имеет тенденцию к снижению, и наоборот.

Чётко прослеживается снижение концентрации кислорода при повышении температуры воды. Это соответствует фундаментальному физическому закону - растворимость газов в воде уменьшается с ростом температуры. При минимальных температурах наблюдается максимальная концентрация кислорода. При повышении температуры, содержание кислорода падает.

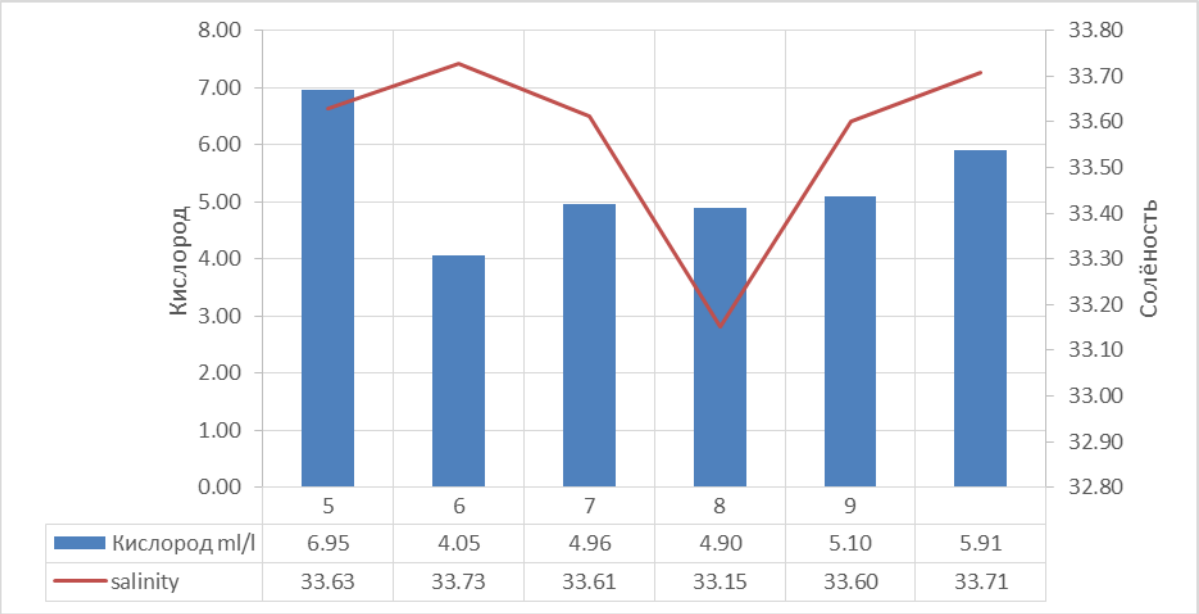

Рис. 3.8. График зависимости концентрации растворённого кислорода от солёности

Обнаружена средняя отрицательная корреляция (r = -0.57) между содержанием кислорода и солёностью воды, характерная для прибрежных морских экосистем, таких как Амурский залив. При увеличении солёности, концентрация кислорода в среднем уменьшается.

Обратная зависимость объясняется влиянием глубинных водных масс: более солёные воды соответствуют глубинным слоям с ограниченным газообменом, процессы разложения органики в придонных слоях усиливают кислородное потребление.

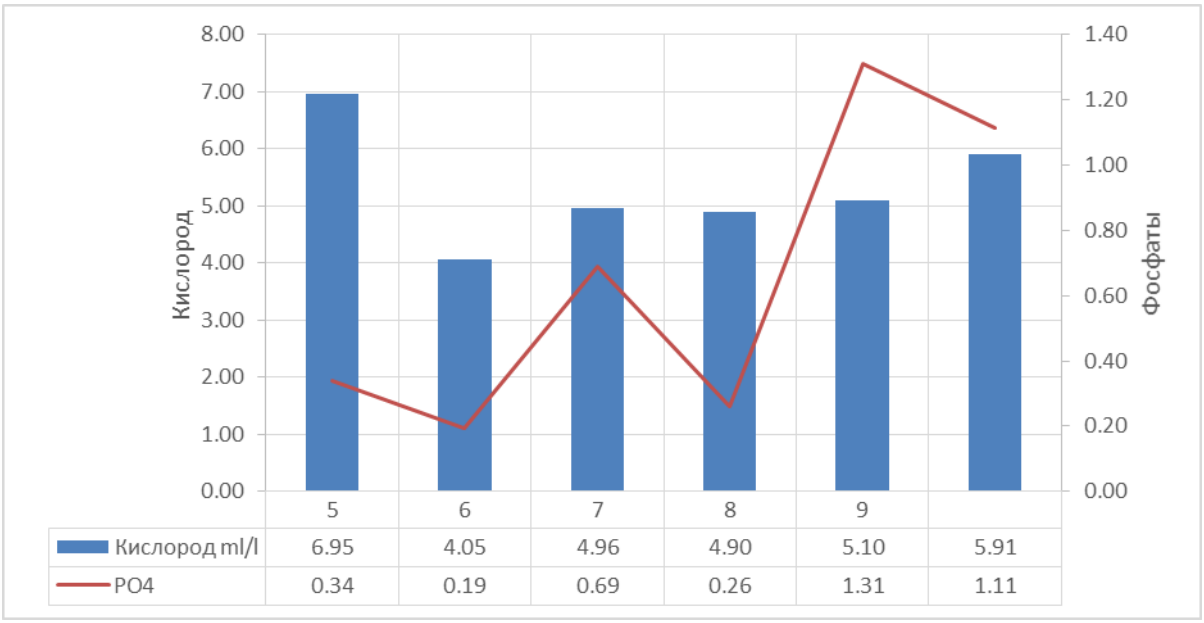

Рис. 3.9. График зависимости концентрации растворённого кислорода от фосфатов

Обнаружена статистически значимая сильная положительная корреляция (r=+0.95) между содержанием кислорода и фосфатов в воде, что имеет комплексную взаимосвязь, имеющую важное значение для понимания экологических процессов в этом регионе

Наблюдаемая закономерность отражает ключевые биогеохимические процессы в морской экосистеме. С одной стороны, фосфаты выступают как лимитирующий фактор первичной продукции, стимулируя рост фитопланктона, чья последующая деструкция приводит к интенсивному потреблению кислорода. С другой стороны, в условиях уже развившейся гипоксии происходит дополнительное высвобождение фосфатов из донных отложений, создавая положительную обратную связь. Особенно ярко эти процессы проявляются в летне-осенний период в придонных слоях на

глубинах более 10 метров, где слабый водообмен способствует накоплению как органического вещества, так и биогенных элементов.

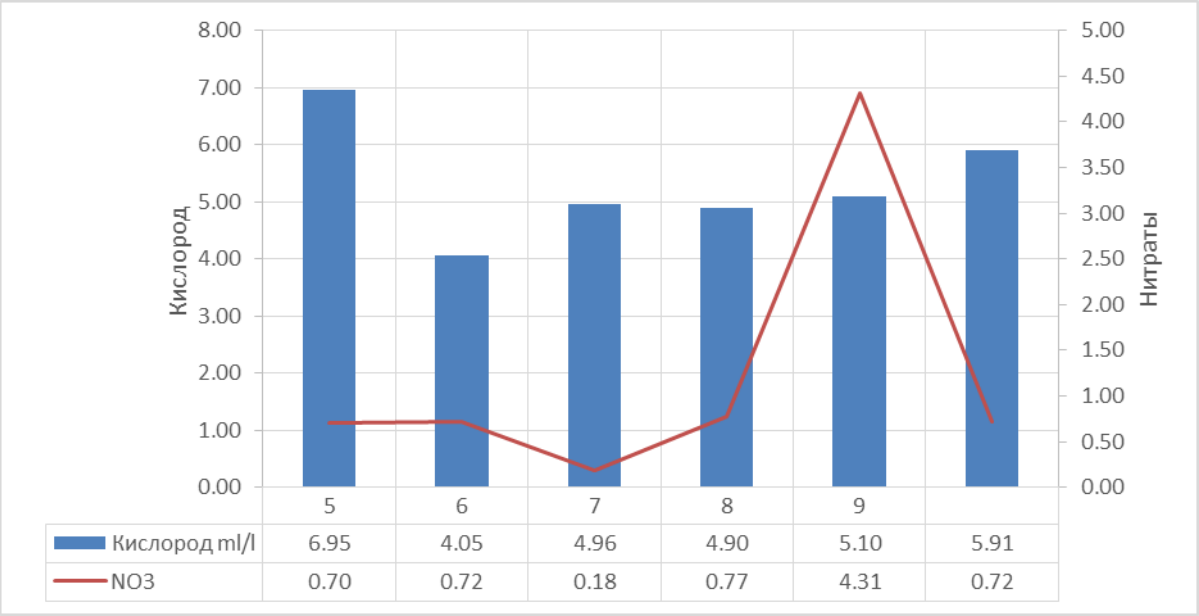

Рис. 3.10. График зависимости концентрации растворённого кислорода от нитратов

График зависимости концентрации кислорода от содержания нитратов в водах Амурского залива после тщательной перепроверки данных демонстрирует сложную и неоднозначную взаимосвязь.

Обнаружена очень слабая ($r \approx -0.10$) и статистически незначимая корреляция между содержанием кислорода и нитратов в воде. Наиболее вероятное объяснение такой нестандартной зависимости кроется в особенностях гидрологического режима Амурского залива. Положительная корреляция может быть следствием поступления богатых нитратами глубинных вод, которые одновременно хорошо аэрированы за счёт интенсивного вертикального перемешивания в зимний период. При этом важную роль играет лимитирование первичной продукции другими

биогенными элементами, в первую очередь фосфатами, что препятствует массовому потреблению кислорода при разложении органического вещества. Отдельного внимания заслуживают аномальные точки данных, в частности значение 4.96 мл/л кислорода при минимальной концентрации нитратов 0.18, которое может отражать локальные зоны активного фотосинтеза, и показатель 5.1 мл/л при максимальных 4.31 единицах нитратов, вероятно соответствующий зимним условиям с высокой растворимостью кислорода.

Экологическая интерпретация этих данных подчёркивает сложность трофических связей в экосистеме Амурского залива. Отсутствие ожидаемой отрицательной корреляции между нитратами и кислородом указывает на то, что традиционные модели эвтрофикации в данном случае требуют существенной корректировки с учётом местных гидрологических особенностей.

3.3. Применение методов анализа эвтрофикации Амурского залива

Эвтрофикация и гипоксия образуют между собой замкнутый патологический цикл, где первое создаёт питательную среду для второго. Этот процесс является ключевым фактором ухудшения состояния морской экосистемы в условиях антропогенного воздействия.

Всё начинается с поступления в морскую воду биогенов, таких как N и P. Они попадают туда через сточные воды из города, сельскохозяйственные дренажные системы, ливневые стоки. Биогены служат питанием и способствуют увеличению формирования первичной продукции, что в свою очередь приводит к масштабному оседанию органического вещества, бактериальному разложению с большими потреблениями кислорода.

Применение индекса E-TRIX для оценки трофического статуса вод Амурского залива демонстрирует значительный рост уровня эвтрофикации, что свидетельствует об усилении процессов органического загрязнения в акватории.

Таб. 3.1. Максимальные из полученных значений индекса за каждый рассматриваемый месяц

Месяц	Максимальное значение индекса E-TRIX
Май	4.1
Июнь	5.1
Июль	4.9
Август	4.8
Сентябрь	5.1
Октябрь	4.1

Видно как уровень трофности, исходящий из значений индекса, балансирует между средним и высоким, что говорит о пограничном качестве вод. Показатели существенно превышают пороговые значения для здоровой экосистемы.

Наименьший уровень эвтрофикация наблюдается лишь в первом и последнем месяце, что объясняется для мая началом сезона, а для октября снижением биологической активности из-за похолодания. Наблюдаются также два пика – июнь, в связи с началом массового цветения водорослей, и сентябрь, что обусловлено ремобилизацией биогенов из донных отложений.

Стабильно высокие значения в промежутке, указывают на хронический характер эвтрофикации.

Согласно руководству Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [8], все месяцы превышают допустимую норму, порог >4.0 рассматривается как опасный для экосистем и рекреационного использования.

Данные свидетельствуют о тяжелом экологическом состоянии Амурского залива с устойчивой гиперэвтрофикацией в течение всего теплого сезона. Особую тревогу вызывает двугорбая динамика с пиками в начале и конце сезона, требующая пересмотра подходов к управлению биогенной нагрузкой.

Был построен график отображающий динамику индекса с мая по октябрь за все года.

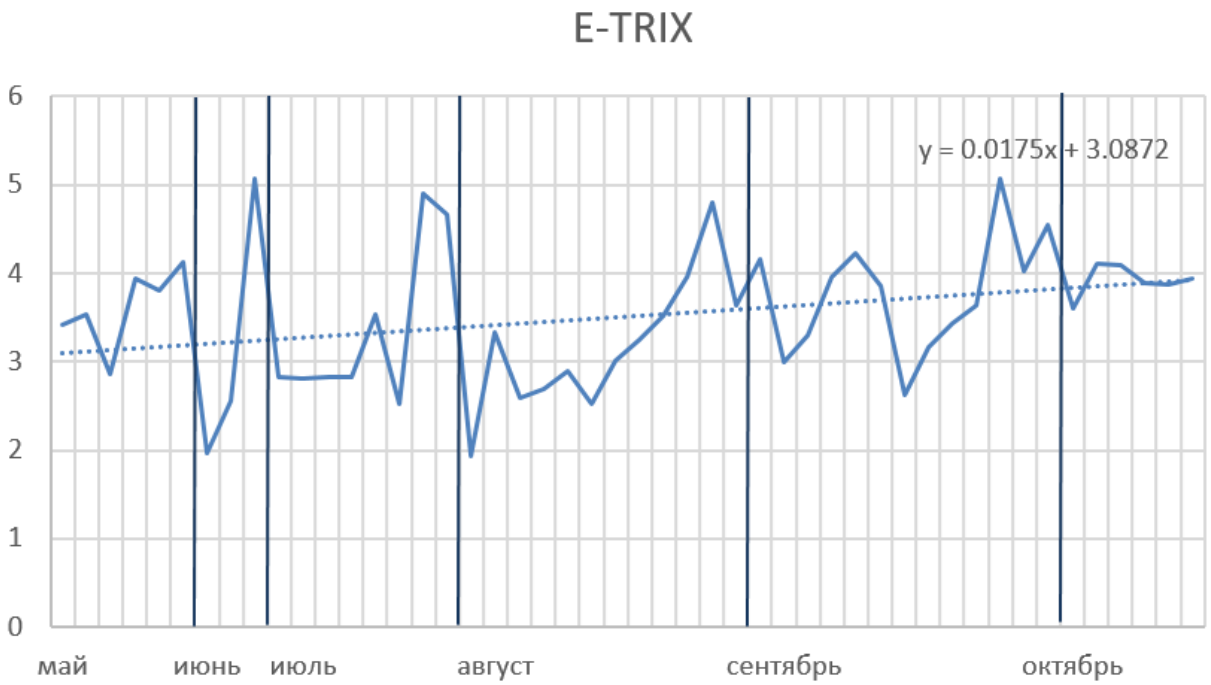

Рис. 3.11. Графика зависимости индекса E-TRIX от месяца в Амурском заливе

На графике наблюдается положительный тренд, что свидетельствует о кумулятивном эффекте эвтрофикации, это позволяет сделать вывод о непрерывном увеличении объёмов разлагающейся биомассы. Уравнение линейного тренда подтверждает устойчивый рост эвтрофикации в Амурском заливе. Даже незначительный месячный прирост (Δ=0.0175) приводит к критическому превышению пороговых значений к августу-сентябрю.

Для надёжности, так как e-trix имеет нелинейное распределение, а происходят скачки значений между месяцами, был проведён также анализ ранговой корреляции Спирмена [приложение Б] (Таб. Б. 1.).

В матрице присутствуют связанные ранги 1-го ряда, поэтому было произведено их переформирование, без изменения важности ранга, между ранговыми номерами сохранились соответствующие соотношения. Изначально, X фактор представлял собой номер соответствующего месяца (5 – май), переформирование было произведено в соответствии следующим значениям: 5=1; 6=7; 7=11; 8=19; 9=31;10=43.

Для расчёта коэффицента ранговой корреляции между переменными для каждой строки вычислили разность между рангами, возвели каждую в квадрат и просуммировали - $\sum di2$ = 13143. Так как среди значений признаков X и Y встречаются одинаковые, т.е. образуются связанные ранги, то коэффицент Спирмена вычисляется как:

$$p = 1 - \frac{\sum 6d^2 + A + B}{n^3 - n} \qquad (3.1)$$

где

$$A = \frac{1}{12}\sum(A_j^3 - A_j)$$

$$B = \frac{1}{12}\sum(B_j^3 - B_j)$$

j - номера связок по порядку для признака x;

A_j - число одинаковых рангов в j-й связке по x;

k - номера связок по порядку для признака y;

B_k - число одинаковых рангов в k-й связке по y.

$$p = 1 - \frac{6 \cdot 13143 + 397}{48^3 - 48} = 0.283 \quad (3.2)$$

Для проверки нулевой гипотезы H_0 : ρ = 0 о равенстве нулю генерального коэффициента ранговой корреляции Спирмена при альтернативной гипотезе H_1 : ρ ≠ 0 с заданным уровнем значимости α необходимо определить критическое значение статистики.

Математически это можно представить следующим образом:

$$T_{kp} = t(\alpha, k) \cdot \sqrt{\frac{1 - p^2}{n - 2}} \quad (3.3)$$

где n - объем выборки; p - выборочный коэффициент ранговой корреляции Спирмена: t(α, к) - критическая точка двусторонней критической области, которую находят по таблице критических точек распределения Стьюдента, по уровню значимости α и числу степеней свободы k = n-2. Если $|p| < T_{kp}$ - нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу. Ранговая корреляционная связь между качественными признаками не значима. Если $|p| > T_{kp}$ - нулевую гипотезу отвергают. Между качественными признаками

существует значимая ранговая корреляционная связь. По таблице Стьюдента находим t(α/2, k) = (0.05/2;46) = 2.311

$$T_{kp} = 2.311 \cdot \sqrt{\frac{1 - 0.283^2}{48 - 2}} = 0.33 \quad (3.4)$$

Поскольку T_{kp}>p, то принимаем гипотезу о равенстве 0 коэффициента ранговой корреляции Спирмена.

Обнаружена слабая положительная корреляция (ρ = 0.28) между месяцами и значением индекса. Это свидетельствует о наличии определённой тенденции к увеличению значений по мере продвижения от начала к концу сезона. Однако, сила данной связи является статистически незначительной, что требует осторожной интерпретации результатов.

Также для проведения анализа можно использовать корреляцию Кендалла [приложение Б] (Таб. Б. 2.). Она даёт более консервативную, но устойчивую оценку, менее чувствительна к объёму данных (для n = 48 даст более стабильные результаты), τ-коэффициент имеет вероятностную интерпретацию: он показывает разницу между долей согласованных и несогласованных пар наблюдений, при большом количестве одинаковых значений E-TRIX (например, повторяющиеся показатели), τ-коэффициент работает точнее.

$$\tau = \frac{P - Q}{\frac{1}{2} \cdot N(N-1)} \quad (3.5)$$

где P – сумма значений столбца P; Q – сумма значений столбца Q; TX*TX* и TY*TY* — поправки на связанные ранги (если есть).

$$\tau = \frac{725 - 403}{1/2 \cdot 48(48-1)} = 0.29 \quad (3.6)$$

Для проверки статистической значимости коэффициента ранговой корреляции Кендалла (τ) на заданном уровне значимости α используется следующий подход. При нулевой гипотезе H_0: τ = 0 (отсутствие корреляционной связи) против альтернативной гипотезы H_1 : τ ≠ 0 (наличие значимой корреляции) необходимо определить критическое значение статистики.

Вычисление осуществляется по формуле:

$$T_{kp} = z_{kp}\sqrt{\frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}} \quad (3.7)$$

где n - объем выборки; z_{kp} - критическая точка двусторонней критической области, которую находят по таблице функции Лапласа по равенству:

$$\Phi(z_{kp})=(1-\alpha)/2 \quad (3.8)$$

Если |τ| < Tkp — нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу. Ранговая корреляционная связь между качественными признаками незначима. Если |τ| > Tkp — нулевую гипотезу отвергают. Между качественными признаками существует значимая ранговая корреляционная связь.

$$\Phi(z_{kp}) = (1 - \alpha)/2 = (1 - 0.05)/2 = 0.475 \quad (3.9)$$

По таблице Лапласа находим z_{kp} = 1.96

$$T_{kp} = 1.96\sqrt{\frac{2(2 \cdot 48 + 5)}{9 \cdot 48(48 - 1)}} = 0.2 \quad (3.10)$$

$\tau > T_{kp}$ — поэтому, отвергаем нулевую гипотезу; ранговая корреляционная связь между оценками по двум тестам значимая. Таким образом, обнаружена статистически значимая положительная корреляция, вероятность случайного возникновения такой связи ≤ α (обычно 5%), значит, результат позволяет использовать выявленную зависимость для прогнозирования или принятия решений.

На графике наблюдалась слабая положительная тенденция изменения индекса трофности E-TRIX в течение вегетационного периода (май-октябрь), описываемая уравнением линейной регрессии y = 0.0175x + 3.0872. Однако низкие значения коэффициентов ранговой корреляции (Спирмена ρ=0.28 и Кендалла τ=0.29) свидетельствуют о статистически незначимой связи между временем года и уровнем трофности.

Индекс, как комплексный показатель трофного статуса водных экосистем, обладает несколькими ключевыми особенностями, влияющими на выбор методов статистического анализа:

1. Нелинейность изменений
2. Наличие сезонных колебаний
3. Чувствительность к внешним воздействиям
4. Пороговый характер экологической значимости

В данном исследовании были применены два метода непараметрической статистики:

Ранговая корреляция Спирмена (ρ=0.28)

Преимущества:

- Не требует нормального распределения данных
- Устойчив к выбросам
- Хорошо отражает монотонные зависимости

Ограничения:

- Менее точен при малых выборках
- Не учитывает связанные ранги

Корреляция Кендалла (τ=0.29)

Преимущества:

- Более устойчив к малым объемам данных
- Лучше работает при наличии связанных рангов
- Имеет четкую вероятностную интерпретацию

Ограничения:

- Менее мощный при нормальном распределении
- Сложнее вычисляется для больших выборок

Полученные значения коэффициентов позволяют сделать следующие выводы о том, что наблюдается слабая положительная тенденция увеличения трофности от мая к октябрю, однако, статистическая значимость связи не достигает общепринятого уровня ($p>0.05$).

Основными возможными причинами слабой корреляции могут являться влияние внешних факторов (погодные условия, антропогенная нагрузка), нелинейный характер сезонной динамики, наличие скрытых переменных, влияющих на трофность.

Для более точного анализа сезонной динамики индекса рекомендуется увеличить временной ряд наблюдений, применить методы множественной регрессии, что позволит выявить комплексное влияние нескольких факторов, использовать анализ главных компонент для выявления скрытых факторов, а также рассмотреть нелинейные модели зависимости.

Но, несмотря на статистически незначимые результаты, применение ранговых методов корреляции было методически оправдано, так как позволило количественно оценить слабую сезонную тенденцию и обосновать необходимость более детального анализа с привлечением дополнительных данных и методов.

Заключение

Гипоксия, проявляющаяся как снижение концентрации растворенного кислорода в воде до критически низких уровней (менее 2 мг/л), представляет собой серьезную экологическую угрозу для Амурского залива. Это явление приобретает особую значимость в условиях интенсивной антропогенной нагрузки, ограниченного водообмена с открытой частью залива Петра Великого и наблюдаемых климатических изменений, которые усиливают сезонную стратификацию водных масс. Особую тревогу вызывает тот факт, что в последние десятилетия продолжительность и площадь распространения гипоксических явлений в заливе неуклонно возрастают.

Экологические последствия гипоксии проявляются на всех уровнях водной экосистемы. В первую очередь страдают гидробионты - у рыб и беспозвоночных нарушаются процессы дыхания и метаболизма, снижается репродуктивная функция, изменяется поведенческая активность. Длительное воздействие дефицита кислорода приводит к структурным изменениям биоценозов - исчезают чувствительные виды, такие как ценные промысловые рыбы, а их место занимают устойчивые к гипоксии организмы, что ведет к упрощению трофических цепей и снижению биоразнообразия. На экосистемном уровне гипоксия нарушает естественные процессы круговорота веществ, способствует накоплению токсичных соединений и в конечном итоге снижает общую продуктивность водной системы.

В Амурском заливе гипоксия имеет выраженные пространственно-временные особенности. Наиболее проблемными являются северо-западные районы, где в летний период (июль-август) в придонных слоях на глубинах 10-

25 метров формируются обширные зоны с критически низким содержанием кислорода. Это связано как с природными факторами (летний прогрев вод, стратификация), так и с антропогенным воздействием, прежде всего - с поступлением биогенных элементов и органического вещества со сточными водами и сельскохозяйственными стоками.

Сложившаяся ситуация требует незамедлительных мер по предотвращению дальнейшего ухудшения кислородного режима. Особое внимание должно быть уделено созданию системы комплексного мониторинга, включающей регулярные гидрохимические наблюдения, дистанционный контроль и математическое моделирование. Параллельно необходимо реализовать природоохранные мероприятия, направленные на снижение биогенной нагрузки, восстановление естественных биофильтров и оптимизацию хозяйственной деятельности в прибрежной зоне. Технические решения, такие как искусственная аэрация критических зон и модернизация очистных сооружений, также могут внести существенный вклад в улучшение ситуации.

Перспективы развития гипоксических явлений в Амурском заливе во многом зависят от своевременности и эффективности принимаемых мер. Бездействие или недостаточные усилия могут привести к необратимым изменениям экосистемы с далеко идущими экологическими и социально-экономическими последствиями для всего региона. В этой связи результаты данного исследования, раскрывающие механизмы формирования гипоксии и предлагающие научно обоснованные подходы к ее предотвращению, приобретают особую практическую значимость для разработки стратегии устойчивого развития прибрежных территорий.

Список литературы

1. Stramma L., et al. (2012). *Climate-Forced Variability of Ocean Hypoxia*. Science, 337(6096), 334-337. DOI:10.1126/science.1222422 Доступно также на ResearchGate.
2. Зайцева П.Д., Еремина Т.Р., Курносова А.С. Межгодовая изменчивость формирования и разрушения гипоксии в Амурском заливе (Японское море) // Комплексные исследования морских экосистем в условиях изменяющегося климата. — 2022. — С. 462-463.
3. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). Физико-географическая характеристика Японского моря
4. Тищенко П.П., Звалинский В.И., Михайлик Т.А., Тищенко П.Я. Гипоксия залива Петра Великого // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 5. С. 512-523. DOI: 10.31857/S0321059619050114
5. Курносова А.С., Матвеев В.И., Криницкая Ю.А., Катайкина О.О. Оценка эвтрофикации вод Амурского залива (Японское море) в 2019-2020 гг. // Океанология. — 2021. — Т. 61, № 6. — С. 845-856.
6. Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index // Environmetrics. - 1998. - Vol. 9, № 3. - P. 329-357. - DOI: 10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:3<329::AID-ENV308>3.0.CO;2-9
7. ФГБУ "ФЕРХИ". (2023). Физико-географическая характеристика Японского моря. [Электронный ресурс].
8. *"Guidelines for Safe Recreational Water Environments: Coastal and Fresh Waters" (WHO, 2003)*
9. EPA (U.S. Environmental Protection Agency)
10. Морозова О. Г. Факторы эвтрофикации экосистемы водоемов-охладителей и принципы оптимизации качества воды для технологических целей и аквакультуры: автореф. дисс. ... дра биолог. наук: 03.00.16 / О. Г. Морозова. - Красноярск, 2003. - 38 с.ля технологических целей и аквакультуры. 11-14
11. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2008.

Приложение А.

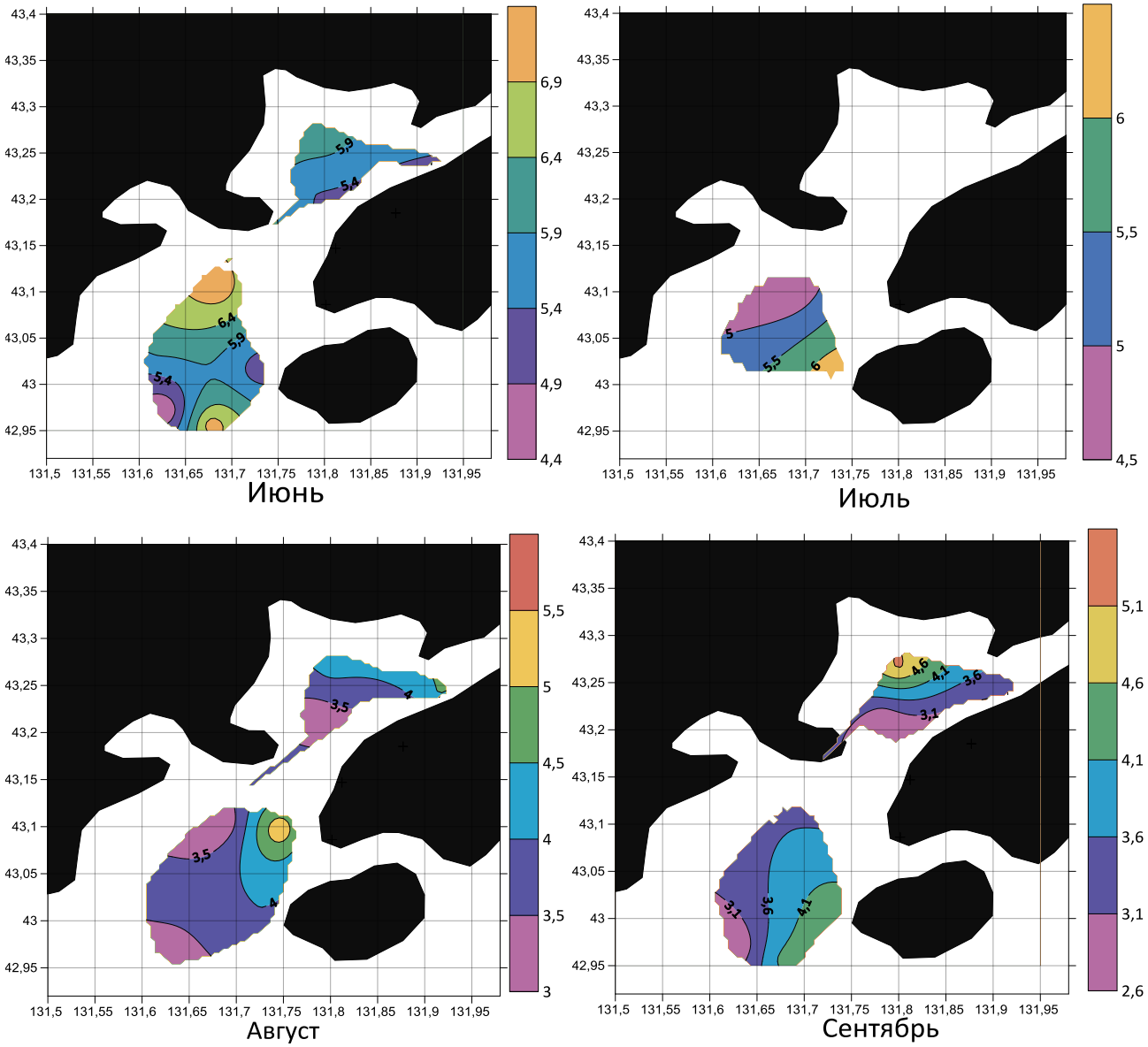

Рис. А. 1. Распределение растворенного кислорода в Амурском заливе с июня по сентябрь 2015г. в придонном слое.

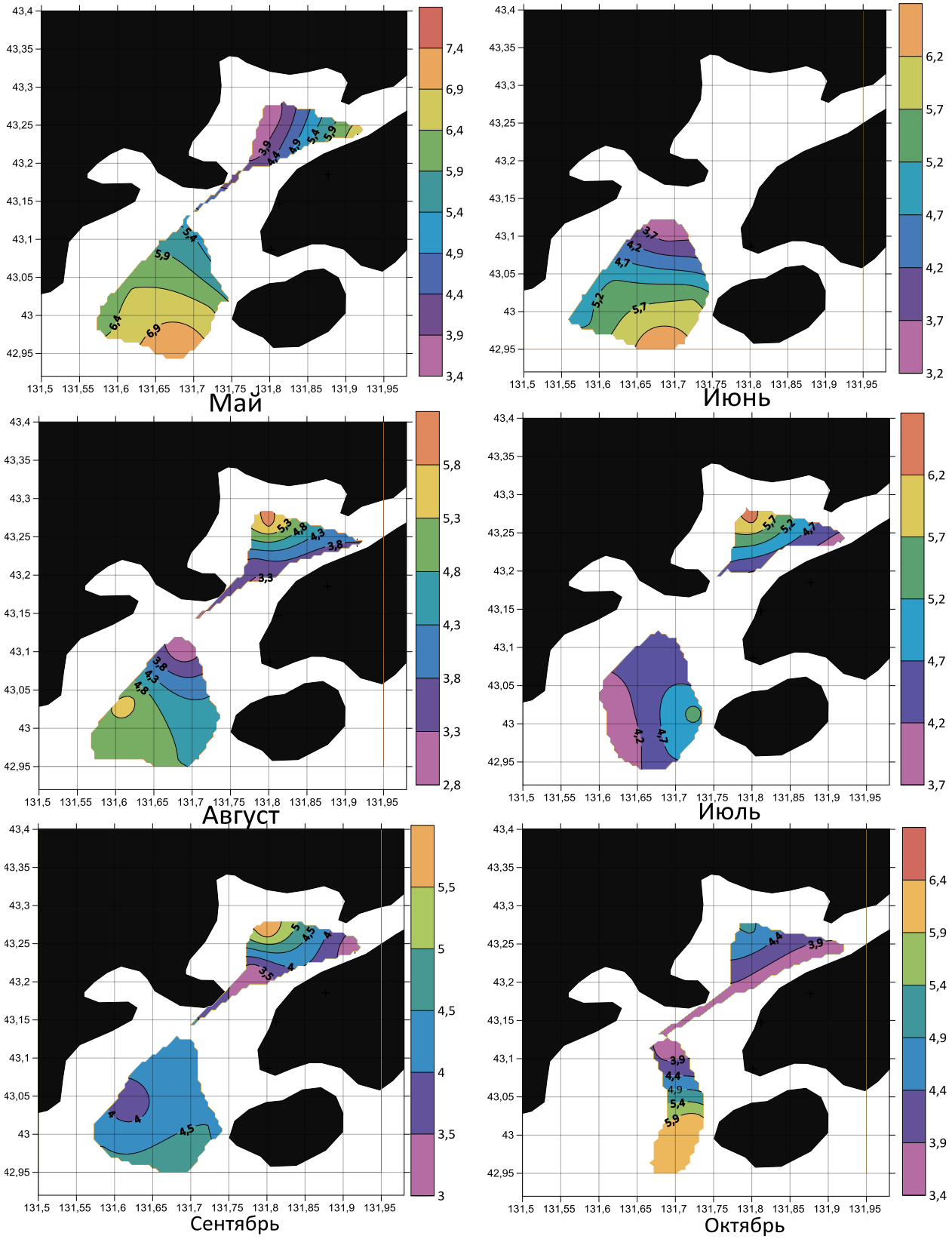

Рис. А. 2. Распределение растворенного кислорода в Амурском заливе с мая по октябрь 2016 г. в придонном слое.

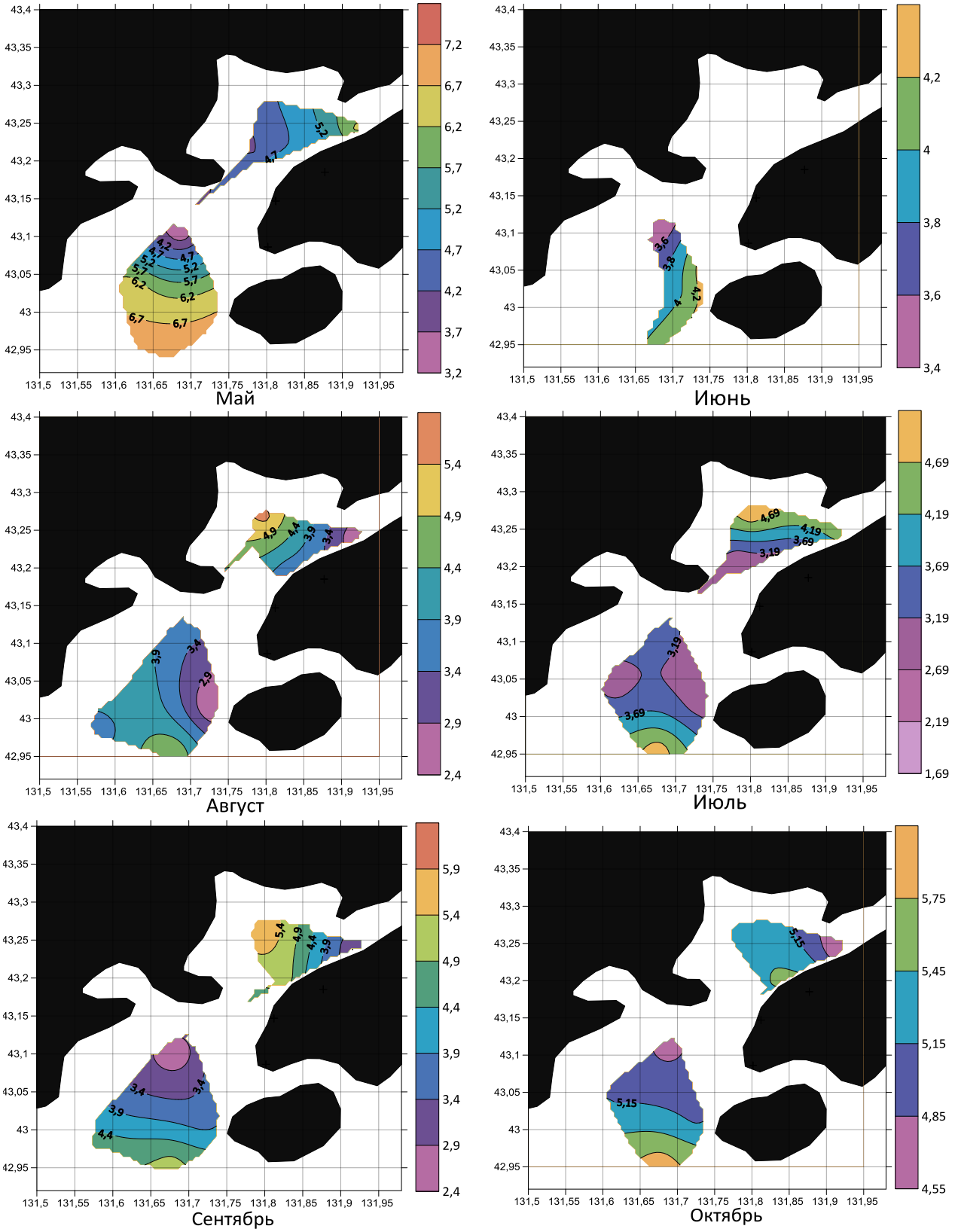

Рис. А. 3. Распределение растворенного кислорода в Амурском заливе с мая по октябрь 2017 г. в придонном слое.

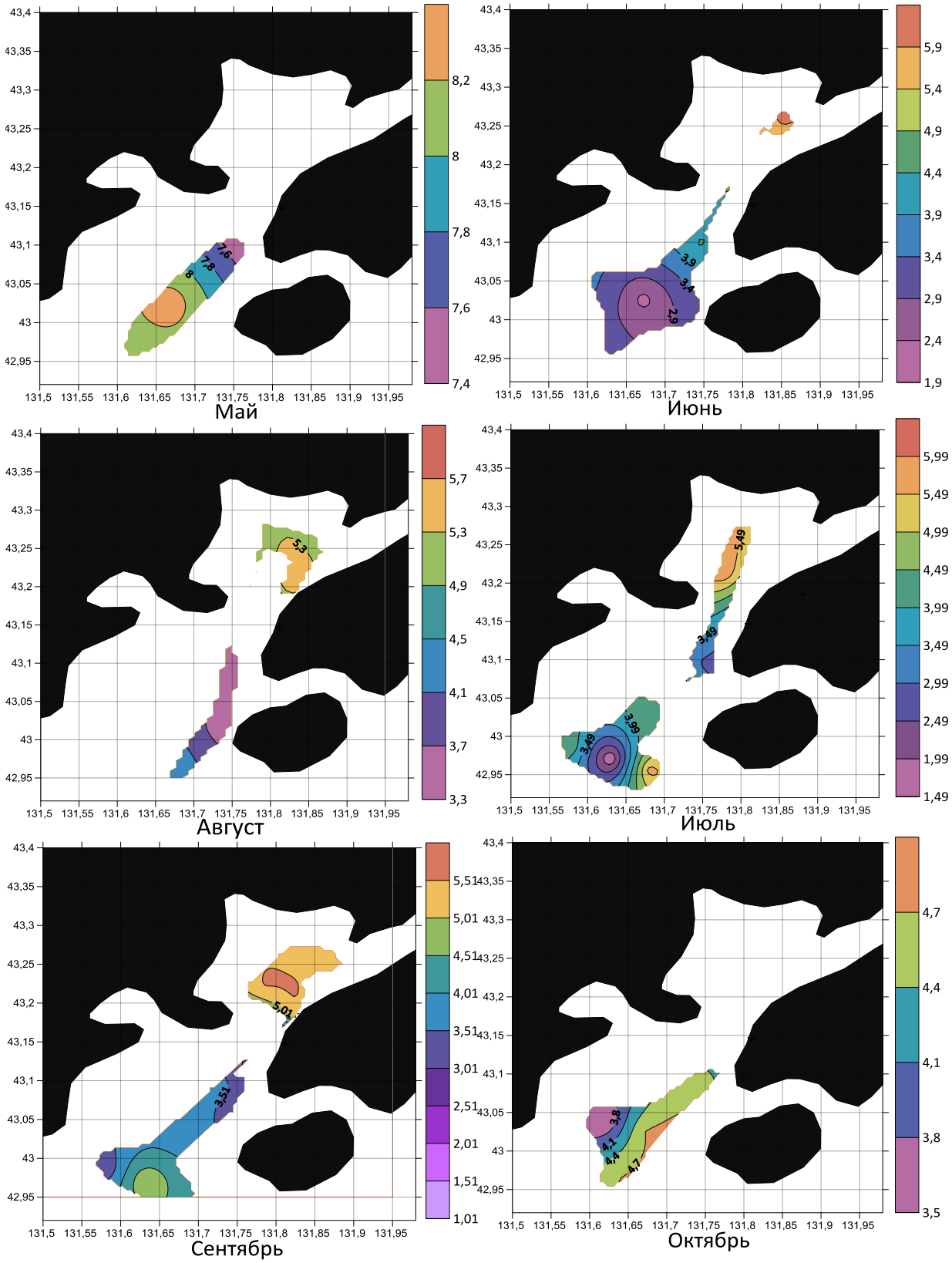

Рис. А. 4. Распределение растворенного кислорода в Амурском заливе с мая по октябрь 2018 г. в придонном слое.

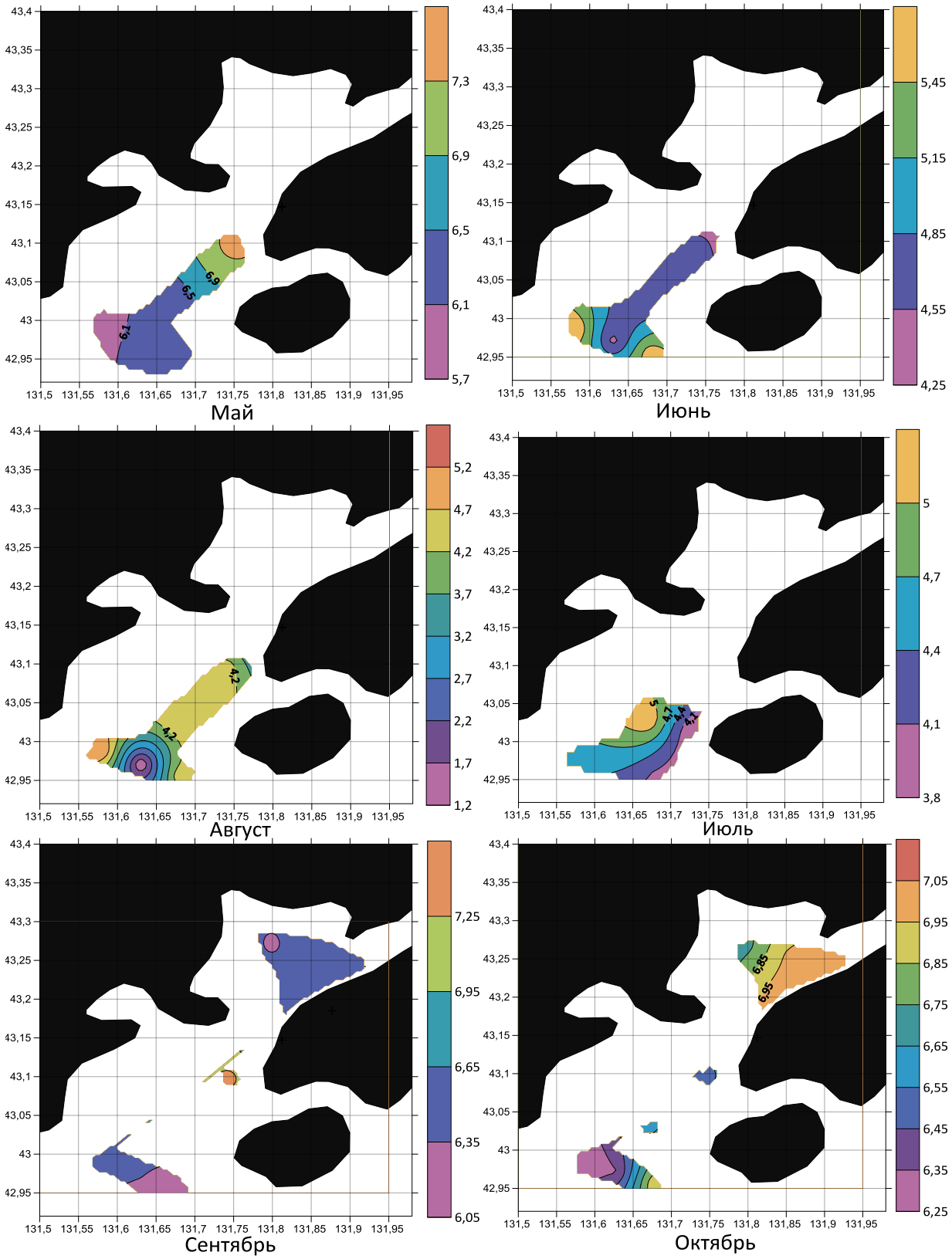

Рис. А. 5. Распределение растворенного кислорода в Амурском заливе с мая по октябрь 2019 г. в придонном слое.

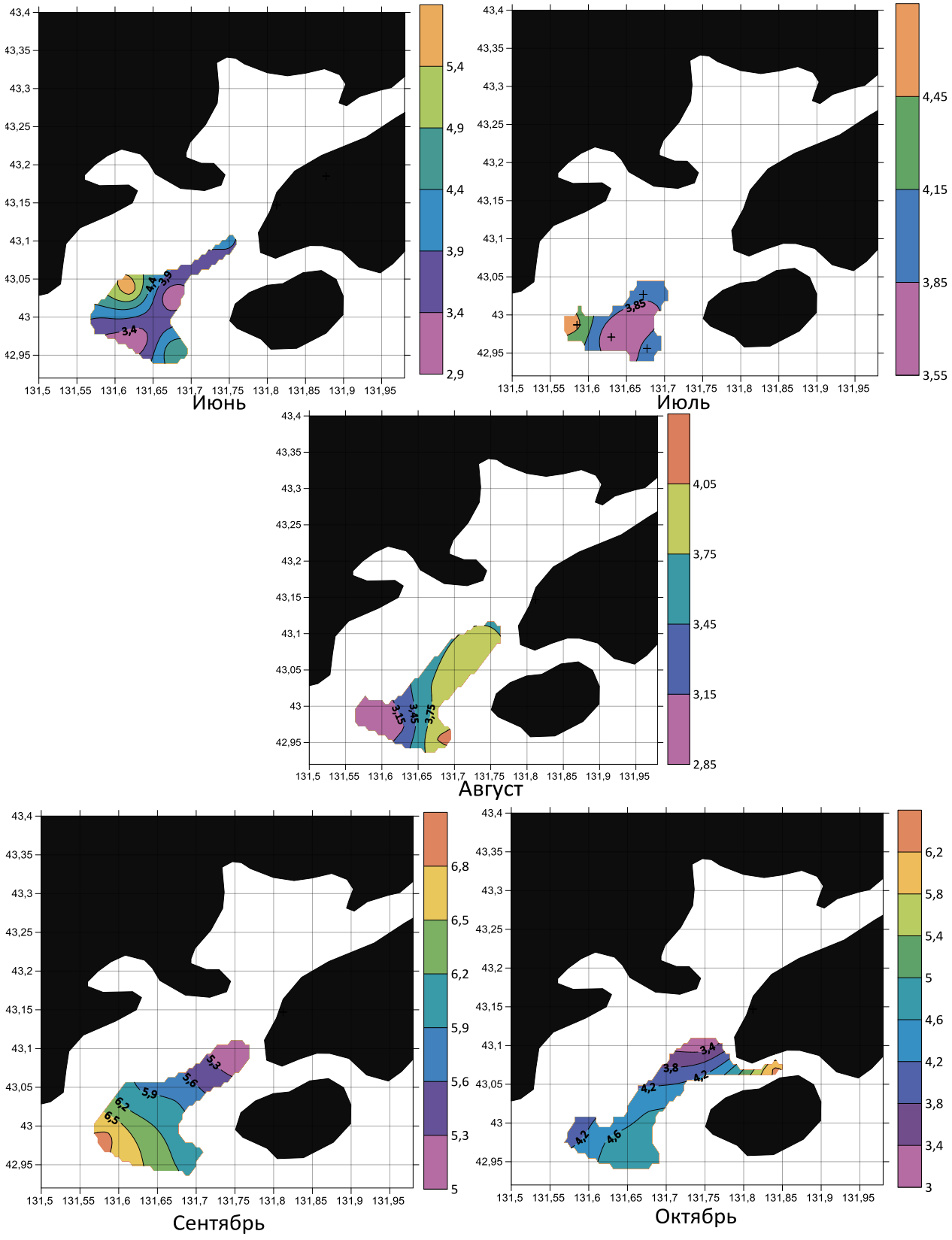

Рис. А. 6. Распределение растворенного кислорода в Амурском заливе с мая по октябрь 2020 г. в придонном слое.

Приложение Б.

Месяц	E-TRIX	Ранг X, dx	Ранг Y, dy	Месяц	E-TRIX	Ранг X, dx	Ранг Y, dy
1	3.4	3.5	21	19	3.2	24.5	18
1	3.5	3.5	25	19	3.5	24.5	23
1	2.9	3.5	13	19	4.0	24.5	35
1	3.9	3.5	33	19	4.8	24.5	45
1	3.8	3.5	29	19	3.6	24.5	28
1	4.1	3.5	40	19	4.2	24.5	41
7	2.0	8.5	2	31	3.0	36.5	15
7	2.6	8.5	5	31	3.3	36.5	19
7	5.1	8.5	47	31	4.0	36.5	36
7	2.8	8.5	11	31	4.2	36.5	42
11	2.8	14.5	9	31	3.9	36.5	30
11	2.8	14.5	10	31	2.6	36.5	7
11	2.8	14.5	12	31	3.2	36.5	17
11	3.5	14.5	24	31	3.4	36.5	22
11	2.5	14.5	3	31	3.6	36.5	27
11	4.9	14.5	46	31	5.1	36.5	48
11	4.7	14.5	44	31	4.0	36.5	37
11	1.9	14.5	1	31	4.5	36.5	43
19	3.3	24.5	20	43	3.6	45.5	26
19	2.6	24.5	6	43	4.1	45.5	39
19	2.7	24.5	8	43	4.1	45.5	38
19	2.9	24.5	14	43	3.9	45.5	32
19	2.5	24.5	4	43	3.9	45.5	31
19	3.0	24.5	16	43	3.9	45.5	34

Таб. Б. 1. Признак X (месяц), Y (показатель индекса E-TRIX) и присвоенные им ранги

X	Y	ранг X, dx	ранг Y, dy	P	Q	X	Y	ранг X, dx	ранг Y, dy	P	Q
5	3.4	1	21	27	20	8	3.2	25	17	21	2
5	3.5	2	23	25	21	8	3.5	26	25	17	5
5	2.9	3	13	33	12	8	4	27	35	9	12
5	3.9	4	30	18	26	8	4.8	28	45	1	19
5	3.8	5	29	18	25	8	3.6	29	26	14	5
5	4.1	6	38	10	32	8	4.2	30	41	3	15
6	2	7	2	40	1	9	3	31	16	16	1
6	2.6	8	5	37	3	9	3.3	32	20	14	2
6	5.1	9	47	1	38	9	4	33	36	6	9
6	2.8	10	9	32	6	9	4.2	34	42	2	12
7	2.8	11	10	31	6	9	3.9	35	31	8	5
7	2.8	12	11	30	6	9	2.6	36	7	12	0
7	2.8	13	12	29	6	9	3.2	37	18	11	0
7	3.5	14	24	20	14	9	3.4	38	22	10	0
7	2.5	15	3	32	1	9	3.6	39	27	9	0
7	4.9	16	46	1	31	9	5.1	40	48	0	8
7	4.7	17	44	2	29	9	4	41	37	3	4
7	1.9	18	1	30	0	9	4.5	42	43	0	6
8	3.3	19	19	20	9	10	3.6	43	28	5	0
8	2.6	20	6	27	1	10	4.1	44	39	1	3
8	2.7	21	8	25	2	10	4.1	45	40	0	3
8	2.9	22	14	24	2	10	3.9	46	32	2	0
8	2.5	23	4	25	0	10	3.9	47	33	1	0
8	3	24	15	23	1	10	3.9	48	34	0	0
										725	403

Таб. Б. 2. Признак X (месяц), Y (показатель индекса E-TRIX), присвоенные им ранги, значение P (количество согласованных пар) и Q (несогласованных пар).

(dx - dy)2	(dx - dy)2
324	0.25
420.25	132.25
100	420.25
812.25	6.25
650.25	289
1260.25	441
42.25	289
6.25	0.25
1521	25
4	20.25
16	930.25
16	361
16	225
90.25	90.25
121	121
992.25	0.25
870.25	42.25
182.25	342.25
25	42.25
342.25	42.25
272.25	182.25
121	182.25
441	182.25
81	13143
49	

(dx - dy)2	(dx - dy)2
324	0.25
420.25	132.25
100	420.25
812.25	6.25
650.25	289
1260.25	441
42.25	289
6.25	0.25
1521	25
4	20.25
16	930.25
16	361
16	225
90.25	90.25
121	121
992.25	0.25
870.25	42.25
182.25	342.25
25	42.25
342.25	42.25
272.25	182.25
121	182.25
441	182.25
81	13143
49	