



Научная статья

УДК 597.552.511:57.087.3

DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-807-820

EDN: NMCGCL

**АЭРОФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
НЕРЕСТОВОЙ МИГРАЦИИ ГОРБУШИ *ONCORHYNCHUS GORBUSCHA*
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО КЛАССА
ПРИМЕНЕНИТЕЛЬНО К ТОПОГРАФИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ
РЕК САХАЛИНА**

А.А. Макоедов, А.В. Скорик, Н.В. Колпаков*

Сахалинский филиал ВНИРО (СахНИРО),
693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, 196

Аннотация. Представлены результаты разработки и апробации методических подходов к аэрофотограмметрическому учету производителей тихоокеанских лососей (на примере горбуши *Oncorhynchus gorbuscha*) в реках юго-восточного побережья и зал. Анива о. Сахалин с использованием серийных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) потребительского класса. Исследования проводились в период нерестовых миграций в июле-августе 2022–2024 гг. на 22 водотоках общей протяженностью около 230 км. Показана возможность оперативного мониторинга с применением БПЛА потребительского класса (DJI Phantom 4 Pro V2.0, DJI Mini 2, DJI Matrice 300 RTK). Установлены оптимальные параметры аэросъемки. Проведен сравнительный анализ эффективности различных моделей БПЛА. Выявлены основные ограничения метода, связанные с погодными условиями и степенью залесенности русел. Разработанная методика является эффективным и экономически целесообразным инструментом для оперативного контроля нерестового хода и может быть использована для регулирования промысла и оценки эффективности воспроизводства тихоокеанских лососей в Сахалинской области.

Ключевые слова: Сахалинская область, тихоокеанские лососи, горбуша, аэрофотограмметрия, БПЛА, беспилотный мониторинг, нерестилища, ортофотоплан, фотограмметрическая обработка

Для цитирования: Макоедов А.А., Скорик А.В., Колпаков Н.В. Аэрофотограмметрический мониторинг нерестовой миграции горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* с использованием БПЛА потребительского класса применительно к топографическим условиям рек Сахалина // Изв. ТИНРО. — 2025. — Т. 205, вып. 4. — С. 807–820. DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-807-820. EDN: NMCGCL.

* Макоедов Антон Анатольевич, заведующий лабораторией, makoedovaa@sakhniro.vniro.ru, ORCID 0000-0003-4474-6245; Скорик Андрей Васильевич, руководитель группы, andrey.prosto.skorik@mail.ru, ORCID 0000-0002-0922-0697; Колпаков Николай Викторович, доктор биологических наук, руководитель филиала, kolpakovnv@sakhniro.vniro.ru, ORCID 0009-0006-0598-4805.

Aerial photogrammetric monitoring on spawning migration of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* using consumer-class UAVs applied to topographic conditions of the rivers in Sakhalin

Anton A. Makoedov*, Andrey V. Skorik**, Nikolay V. Kolpakov***

*—**** Sakhalin branch of VNIRO (SakhNIRO),

196, Komsomolskaya Str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693023, Russia

* head of sector, makoedovaa@sakhniro.vniro.ru, ORCID 0000-0003-4474-6245

** head of group, andrey.prosto.skorik@mail.ru, ORCID 0000-0002-0922-0697

*** D.Biol., head, kolpakovnv@sakhniro.vniro.ru, ORCID 0009-0006-0598-4805

Abstract. Methodology for the aerial photogrammetric counting of pacific salmon spawners with serial unmanned aerial vehicles (UAVs) is developed and tested for the rivers of southeastern Sakhalin on example of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*. In total, 22 water streams with the total length of about 230 km were surveyed during the spawning migrations in July-August of 2022–2024. Traditional methods of the counting are labor-intensive and ineffective in this area because of hard relief and high afforestation of the river shores, but operational monitoring with consumer-class UAVs (DJI Phantom 4 Pro V2.0, DJI Mini 2, DJI Matrice 300 RTK) is available. The optimal parameters for aerial survey have been established: the flight altitude 20–100 m, UAV speed up to 6 m/s, longitudinal overlap of the images $\geq 80\%$ and the transverse overlap $\geq 40\%$. The materials of 88 flight missions are processed in Agisoft Metashape Professional software package and orthophotoplans with resolution of 1.0–1.5 cm/pixel are obtained, suitable for visual identification and counting of fish using the geoinformation system NextGIS QGIS. Effectiveness of different UAV models is compared. The main limitations of the method concerned to weather conditions and the riverbed cover are defined. The developed methodology is an effective and economically feasible tool for operational control of spawning that can be used for the fishery regulation and evaluation of reproduction efficiency for pacific salmon in the Sakhalin Region.

Keywords: Sakhalin Region, pacific salmon, pink salmon, aerial photogrammetry, UAV, unmanned monitoring, spawning ground, orthophotoplan, photogrammetric processing

For citation: Makoedov A.A., Skorik A.V., Kolpakov N.V. Aerial photogrammetric monitoring on spawning migration of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* using consumer-class UAVs applied to topographic conditions of the rivers in Sakhalin, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2025, vol. 205, no. 4, pp. 807–820. (In Russ.). DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-807-820. EDN: NMCGCL.

Введение

Тихоокеанские лососи рода *Oncorhynchus* — важнейшие объекты промысла и искусственного разведения молоди на Дальнем Востоке России. От состояния их запасов в значительной мере зависят экономика региона и жизнь местного населения. Надежная и оперативная оценка численности производителей, заходящих на нерест, служит основой для прогнозирования подходов, определения объемов возможного вылова и принятия управлеченческих решений по регулированию промысла [Макоедов, Макоедов, 2018, 2022а, б; Макоедов, 2019, 2023; Макоедов и др., 2019, 2023, 2024; Колпаков и др., 2025].

Традиционные методы мониторинга на нерестилищах, такие как пешие учеты, визуальные наблюдения с берега или с лодок, в условиях Сахалинской области сопряжены с существенными трудностями. Регион характеризуется экстремально сложными природно-географическими условиями: густая лесная растительность, горный рельеф, высокая извилистость и малая ширина речных русел, а также их труднодоступность для наземного транспорта. Это приводит к низкой презентативности выборки, высокой доле неучтенных нерестовых площадей и значительным трудозатратам, что ограничивает частоту повторения наблюдений и пространственный охват мониторинга.

В последние годы на Дальнем Востоке России активно развиваются методы беспилотного мониторинга численности и распределения тихоокеанских лососей, показав-

шие свою эффективность в различных условиях [Свиридов и др., 2022а; Никифоров и др., 2023]. Однако их успешное применение напрямую зависит от специфики региона (степень залесенности речных бассейнов, орографии и метеоусловий) [Никифоров и др., 2023]. В частности, в результате ранее проведенных исследований, выполненных с участием одного из авторов данной статьи на реках Сахалина и Хабаровского края, была установлена низкая эффективность маршрутного учета с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для водотоков с высокой степенью залесенности, турбулентностью и мутностью воды, что потребовало поиска альтернативных подходов, таких как учет на фиксированном створе с контрастным фоном [Свиридов и др., 2022б].

Развитие технологий дистанционного зондирования, в частности БПЛА, открывает новые возможности для обследования нерестилищ [Kudo et al., 2012; Groves et al., 2016; Запорожец, Запорожец, 2017; Фадеев и др., 2019; Harris et al., 2019; Roncoroni, Lane, 2019; Запорожец и др., 2020; Harrison et al., 2020; Дуленин и др., 2021; Ponsioen et al., 2021]. Преимущества БПЛА включают высокое пространственное разрешение получаемых данных, оперативность, мобильность и относительно низкую стоимость работ по сравнению с авиаучетами с борта пилотируемых аппаратов (самолет, вертолет).

Однако применение специализированных БПЛА, оснащенных высокоточным геодезическим оборудованием (например, модулями RTK/PPK), предполагает существенные финансовые затраты и требует высокой квалификации операторов, что ограничивает их широкое применение в рыбохозяйственных исследованиях.

Цель настоящей работы — разработка и апробация экономичных, эффективных и легко воспроизводимых методических подходов к аэрофотограмметрическому учету лососей (на примере горбуши) с использованием доступных БПЛА потребительского класса в сложных природных условиях Сахалинской области. В отличие от ранее предложенного для Сахалинской области альтернативного метода учета на створе, данное исследование направлено на адаптацию и развитие именно маршрутного фотограмметрического метода, позволяющего получать данные о пространственном распределении производителей на нерестилищах.

Материалы и методы

Районы и сроки работ. Исследования проводили в период нерестовых миграций горбуши в июле-августе 2022–2024 гг. на 22 контрольных водотоках юго-восточного побережья о. Сахалин (с севера на юг реки: Макаровка, Лесная, Лазовая, Пугачевка, Баклановка, Айдар, Фирсовка, Жуковка, Вознесенка, Долинка, Очепуха, Курейка, Пинда, Горная, Гремучка, Кедровка) и зал. Анива (с запада на восток реки: Урюм, Бачинская, Таранай, Игривая, Островка, Новикова). Общая протяженность обследованных участков рек составила порядка 230 км (рис. 1).

Условия съемки. Исследуемая территория характеризуется горно-лесистым рельефом с выраженной расчлененностью и наличием труднопроходимых участков. Гидрографическая сеть представлена множеством мелких и средних водотоков со средней шириной русел около 10 м и значительной извилистостью. Глубина рек на большей части их протяженности не превышает 1 м. Плотный сомкнутый полог леса частично или полностью закрывает русла водотоков, что создает основные трудности для аэросъемки и является ключевым лимитирующим фактором (рис. 2). Ввиду сложного рельефа и необходимости поддержания надежного радиоконтакта с БПЛА полевые работы сочетались с пешими маршрутными обследованиями вдоль береговой линии. Следует отметить, что необходимость надежного радиоконтакта при ручном управлении беспилотными летательными аппаратами потребительского класса обусловлена ограниченной надежностью автономных навигационных алгоритмов в условиях сложного рельефа и возможного затенения сигналов связи и позиционирования. На пересеченной местности возрастает вероятность потери глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) и ухудшения работы датчиков, что снижает точность

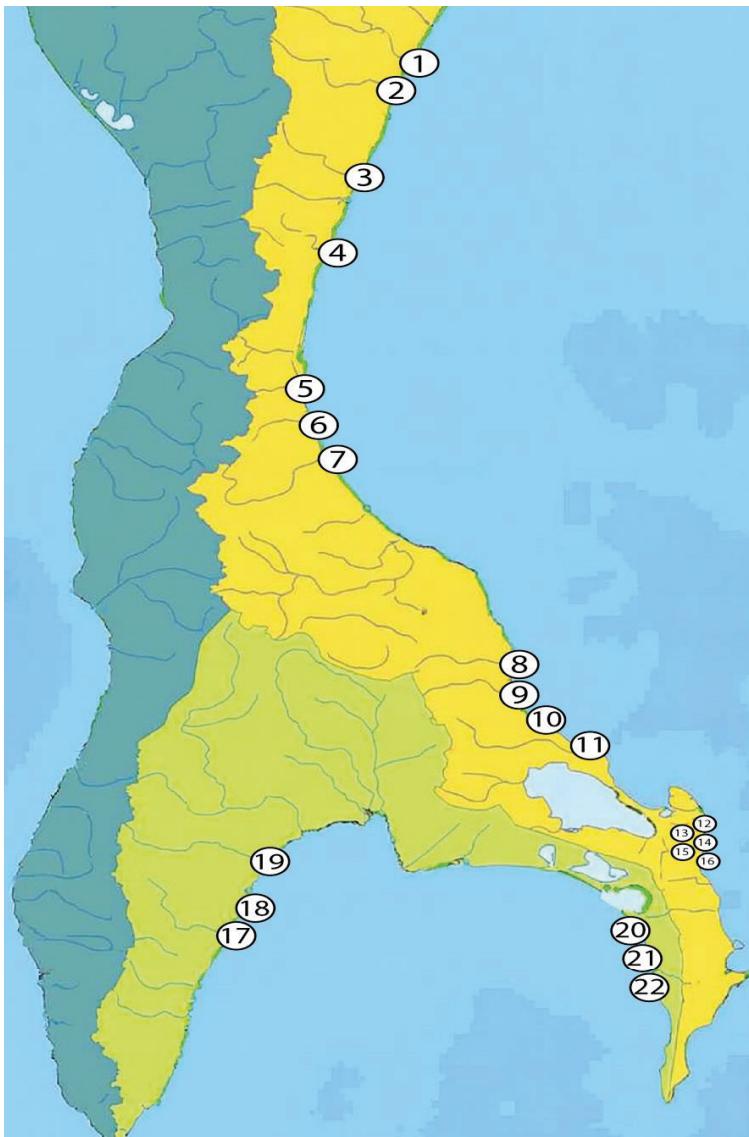


Рис. 1. Расположение рек о. Сахалин, обследованных с применением БПЛА в 2022–2024 гг.: юго-восточное побережье: 1 — Макаровка, 2 — Лесная, 3 — Лазовая, 4 — Пугачевка, 5 — Баклановка, 6 — Айдар, 7 — Фирсовка, 8 — Жуковка, 9 — Вознесенка, 10 — Долинка, 11 — Очепуха, 12 — Курейка, 13 — Пинда, 14 — Горная, 15 — Гремучка, 16 — Кедровка; зал. Анива: 17 — Урюм, 18 — Бачинская, 19 — Таранай, 20 — Игривая, 21 — Островка, 22 — Новикова

Fig. 1. Scheme of the rivers on southeastern Sakhalin Island surveyed with UAVs in 2022–2024: 1 — Makarovka, 2 — Lesnaya, 3 — Lazovaya, 4 — Pugachevka, 5 — Baklanovka, 6 — Aidar, 7 — Firsovka, 8 — Zhukovka, 9 — Voznesenka, 10 — Dolinka, 11 — Ochepukha, 12 — Kureika, 13 — Pinda, 14 — Gornaya, 15 — Gremuchka, 16 — Kedrovka, 17 — Uryum, 18 — Bachinskaya, 19 — Taranai, 20 — Igrivaya, 21 — Ostrovka, 22 — Novikova

автономного полета и увеличивает риск столкновений из-за неполной ситуационной осведомленности бортовых систем. В этих условиях ручной режим, основанный на стабильном двустороннем радиоканале и визуально-телеметрической обратной связи, обеспечивает более оперативную адаптацию траектории, позволяя оператору компенсировать недостатки автоматизации и оперативно реагировать на динамично меняющуюся окружающую обстановку, что делает его более надежным и безопасным по сравнению с автономными сценариями.

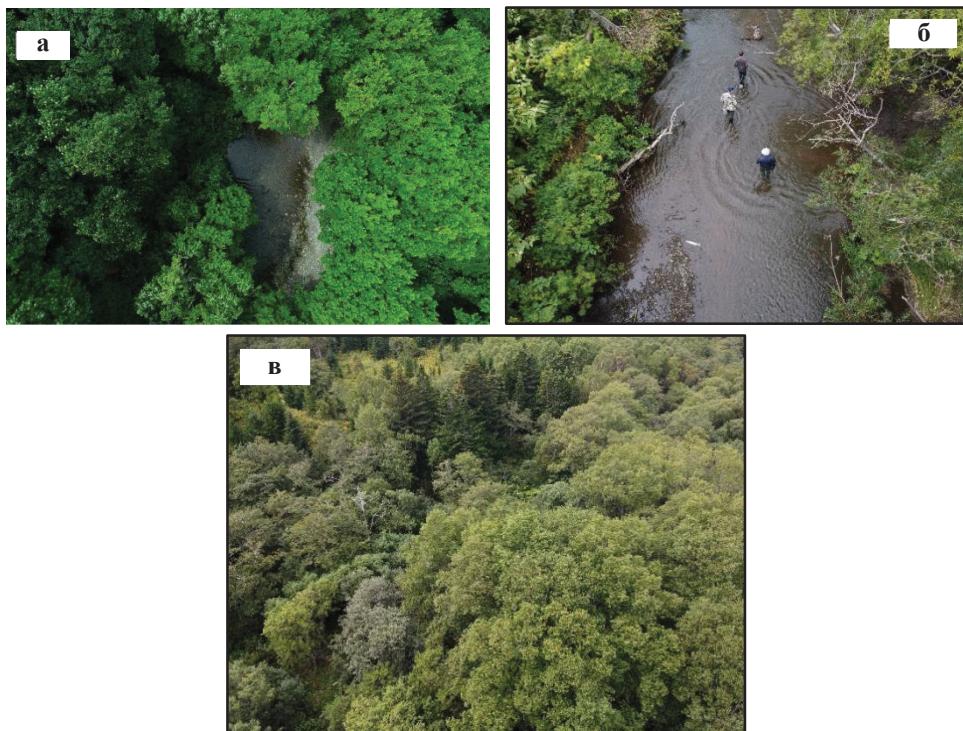


Рис. 2. Условия съемки на реках Сахалина: **а** — частично закрытое кронами деревьев русло водотока; **б** — открытые участки водотоков (пешие маршрутные обследования нерестилищ); **в** — полностью закрытое кронами деревьев русла водотоков

Fig. 2. Shooting conditions on the Sakhalin rivers: **a** — riverbed partially covered by tree crowns; **б** — open waters (hiking route surveys of spawning grounds); **в** — riverbeds completely covered by tree crowns

Оборудование и планирование полетов. Для проведения аэросъемочных работ использовался парк мультироторных БПЛА потребительского класса: DJI Phantom 4 Pro V2.0 (2 ед.), DJI Mini 2 (1 ед.) и DJI Matrice 300 RTK (1 ед.) с камерой Zenmuse P1. Выбор моделей БПЛА был сопоставим с подходом, успешно апробированным другими исследователями [Свиридов и др., 2022а], и позволил провести сравнительный анализ их эффективности в условиях о. Сахалин.

Подготовительный этап включал полную проверку и калибровку оборудования. Решение о проведении полетов принималось на основе анализа текущих и прогнозируемых метеорологических условий с использованием специализированного веб-сервиса Windy.com, что позволяло минимизировать риски, связанные с неблагоприятными погодными факторами. В отличие от методик, предполагающих выполнение заранее запрограммированных автономных миссий [Свиридов и др., 2022а], в условиях сложной топографии Сахалина полетные миссии выполнялись преимущественно в ручном режиме управления с использованием штатного программного обеспечения (DJI GO 4, DJI Fly). Такой подход обеспечивал возможность гибкой коррекции траектории полета в соответствии с изгибами речного русла, оперативного маневрирования для обхода препятствий и мгновенной настройки параметров съемки в зависимости от изменений освещенности.

Протокол полевых работ включал:

1. Прибытие на запланированный участок реки, визуальную оценку условий съемки (степень открытости русла, освещенность, наличие препятствий).
2. Выбор безопасной площадки для взлета и посадки БПЛА.
3. Калибровку оборудования и проверку связи.

4. Выполнение полетных миссий в соответствии с выбранной схемой (однопролетная или двухпролетная).

5. Оперативный просмотр полученных снимков для контроля качества.

6. Перемещение к следующему участку.

Место дислокации полевой группы, как правило, располагалось в средней части исследуемого участка реки, что обеспечивало возможность выполнения полетов на значительную протяженность (до 4 км) как вниз, так и вверх по течению в зависимости от пересеченной местности.

Параметры аэросъемки. В ходе полевых работ проводились оценки различных параметров аэросъемки для определения оптимальных значений, обеспечивающих баланс между качеством данных, безопасностью использования (пилотирования) БПЛА и производительностью. Аэрофотосъемка осуществлялась в период с 15 июля по 31 августа. Высота полета варьировалась в диапазоне от 20 до 100 м для тестирования возможности идентификации рыб при разном пространственном разрешении. Скорость полета составляла от 2 до 8 м/с для оценки степени смаза изображения. Интервал между снимками составлял 2 с. Камера была ориентирована в надир (с отклонением до 10° в отдельных случаях для минимизации бликов на воде). Обеспечивалось продольное пересечение снимков не менее 80 % и поперечное — не менее 40 %. Для этого применялись и сравнивались две схемы полетов — однопролетная вдоль срединной линии для узких русел (ширина до 15 м) и двухпролетная (по левому и правому берегу) для более широких участков (рис. 3).

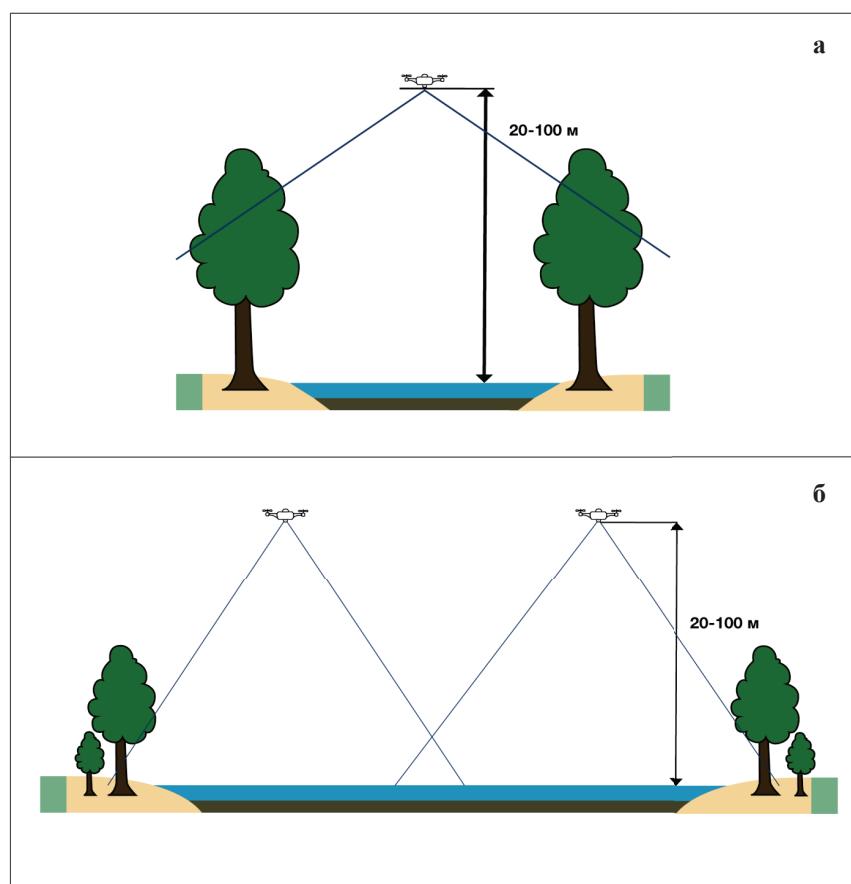


Рис. 3. Варианты схемы выполнения аэрофотосъемки: **а** — однопролетная схема вдоль срединной линии для узких русел рек; **б** — двухпролетная схема для более широких участков

Fig. 3. Variants of tracks for aerial survey: **a** — single-span scheme along the median line for narrow riverbeds; **b** — two-span scheme for wide riverbeds

Настройки параметров съемки задавались вручную для каждого вылета в зависимости от условий освещенности. Используемые значения экспозиционных параметров варьировали в пределах: ISO — 100–200, диафрагма — F/4.0–5.6, выдержка — 1/400–1/600 с.

Использование ручного режима пилотирования, несмотря на его меньшую автоматизацию по сравнению с заранее запрограммированными миссиями [Свиридов и др., 2022а], было признано нами ключевым для работы на узких извилистых и сильно залесенных сахалинских водотоках, так как обеспечивало значительную гибкость и безопасность. Данный подход является основной адаптацией стандартной методики к специфическим условиям Сахалина.

Обработка данных. Фотограмметрическая обработка полученных материалов (общий объем 73 235 снимков) выполнялась в программном комплексе Agisoft Metashape Professional (ГК «Геоскан», Россия). Процесс включал следующие этапы.

1. Построение разреженного облака точек на основе автоматического сопоставления ключевых точек на перекрывающихся снимках.

2. Построение плотного облака точек.

3. Создание цифровой модели поверхности (ЦМП) или цифровой модели рельефа (ЦМР).

4. Генерация ортофотоплана с высоким пространственным разрешением (1,0–1,5 см/пиксель).

Визуальное дешифрирование и подсчет особей лососей проводились в настольной геоинформационной системе NextGIS QGIS. Процедура подсчета включала следующие этапы.

1. Импорт ортофотоплана в формате GeoTIFF в систему координат WGS 84/UTM 54N.

2. Создание нового векторного слоя с типом геометрии «Точки».

3. Последовательное нанесение точечных объектов на каждую идентифицируемую особь рыбы (производителя горбуши или нерестовый бугор) с использованием инструмента «Добавить объект».

4. Подсчет общего количества точек в слое для получения суммарной численности на участке.

Для обработки данных использовалась рабочая станция на базе высокопроизводительного ноутбука с дискретной видеокартой.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных полевых работ за три сезона было выполнено 88 успешных полетных миссий и собран обширный массив аэрофотоснимков нерестовых участков.

Фотограмметрическая обработка позволила получить высокодетальные ортофотопланы, которые обеспечили уверенную визуальную идентификацию отдельных особей тихоокеанских лососей на мелководных участках рек (рис. 4). Разрешение 1,0–1,5 см/пиксель оказалось достаточным для распознавания не только силуэтов живых рыб, но и деталей, таких как форма тела, а также сненки.

Сравнительный анализ показал, что выбор беспилотного летательного аппарата зависит от конкретных задач аэрофотосъемки. Комплекс DJI Matrice 300 RTK с камерой Zenmuse P1 продемонстрировал наилучшие технические характеристики. Благодаря полнокадровой матрице и высокому количеству эффективных пикселей он позволил проводить съемку с большой высоты (около 100 м) без потери пространственного разрешения (1,3 см/пикс на высоте 100 м), что повышало безопасность полетов и производительность работ. Его повышенная устойчивость к ветровым нагрузкам способствовала экономии заряда аккумуляторов и увеличению продолжительности полета.

БПЛА DJI Phantom 4 Pro V2.0 оказался оптимален для оперативной съемки небольших сложных участков, где наиболее важны мобильность и простота эксплуатации. Разрешение в 1,3 см/пикс для данной модели достигалось при высоте полета 50 м.



Рис. 4. Учет производителей горбуши (р. Долинка, июль 2022 г.): **а** — сегмент ортофотоплана; **б** — увеличенный сегмент ортофотоплана (внешний вид производителей горбуши); **в** — внешний вид сченки горбуши

Fig. 4. Pink salmon spawners counting in the Dolinka River in July 2022: **a** — orthophotoplane segment; **б** — enlarged segment of the orthophotoplane (appearance of pink salmon spawners); **в** — appearance of pink salmon cuttings

DJI Mini 2, в силу своих малых габаритов и массы, был полезен для быстрой разведки и работы в условиях особо стесненного пространства, но более чувствителен к ветру.

На основе анализа материалов 88 полетных миссий и последующей фотограмметрической обработки были установлены оптимальные параметры аэросъемки для условий горно-лесистых рек Сахалина. В результате сравнения результатов съемки с разными настройками выявлено, что для уверенной визуальной идентификации производителей горбуши необходима высота полета, обеспечивающая пространственное разрешение итоговых ортофотопланов в диапазоне 1,0–1,5 см/пиксель, что достигалось при высоте 20–100 м в зависимости от модели БПЛА. Превышение скорости полета свыше 6 м/с приводило к повышенному риску смаза изображения, поэтому данное значение было принято в качестве максимального. Однако на меньшей высоте съемки и при сниженной освещенности водотока допустимый порог скорости становится еще ниже, поскольку даже небольшое увеличение движения БПЛА в таких условиях приводит к заметному росту смаза и ухудшению качества изображения.

Анализ качества построения ортофотопланов показал, что заявленное продольное перекрытие не менее 80 % и поперечное не менее 40 % являются минимально достаточными для построения бесшовных моделей ортофотопланов без пропусков данных.

Сравнительный анализ эффективности предварительно запрограммированных автономных миссий и ручного пилотирования однозначно показал преимущество последнего в условиях сложной топографии Сахалина. Ключевым преимуществом ручного режима пилотирования явилась возможность оперативного маневрирования в узких извилистых руслах, постоянный визуальный контроль для избегания столкновений с препятствиями (ЛЭП, деревья) и возможность мгновенной коррекции параметров съемки в ответ на изменение освещенности. Эксплуатация аппаратов в полевых условиях

позволила установить, что максимальная дальность устойчивой связи между пультом управления и БПЛА в условиях плотной растительности и наличия орографических преград составила до 2 км, на открытой местности — до 3 км.

Проведенные исследования показали, что, в отличие от рек Амурского лимана, Охотского района Хабаровского края и притоков Амура, где успешно применяются высокоматематизированные методы с заранее запрограммированными миссиями [Свиридов и др., 2022б], большинство обследованных водотоков Сахалинской области обладают ограниченной пригодностью для такого подхода. Установленные ограничения обусловлены совокупностью гидрологических, морфологических и гидродинамических особенностей данных объектов, главными из которых являются исключительно высокая извилистость и залесенность русел. В связи с этим ключевым достижением настоящей работы по сравнению с более ранними исследованиями стала адаптация метода БПЛА-мониторинга к сложнейшим топографическим условиям Сахалина за счет отказа от полностью автономных полетов в пользу гибкого ручного пилотирования. Это позволило проводить съемку на ранее недоступных для автоматизированных методов участках рек.

Практика выполнения учетных работ, проводимых с 2022 г., способствовала совершенствованию навыков применения беспилотных летательных аппаратов и обработки получаемых материалов, что позволило расширить перечень обследуемых водотоков. В процессе исследований были организованы систематизация и хранение собранных данных на внешних носителях в форме реестра, оформленного в табличном редакторе (MS Excel). Формирование такой базы данных обеспечивает возможность ведения статистического учета подходов тихоокеанских лососей и служит доказательной основой для последующего анализа динамики их распределения.

Проведение не менее чем двукратного обследования одних и тех же участков в течение нерестового сезона позволило не только отследить динамику заполнения рек производителями горбуши, но и оценить воспроизводимость результатов. Визуальный подсчет по ортофотопланам обеспечивал высокую детализацию и возможность последующей верификации. Однако субъективность оператора остается фактором, влияющим на точность. Для повышения прецизионности в будущем целесообразно разработать и внедрить алгоритмы автоматического и полуавтоматического дешифрирования на основе методов глубокого обучения. Следует отметить, что первые успешные шаги в этом направлении уже сделаны другими исследователями применительно к учету сиенки кеты *Oncorhynchus keta*, производителей кеты и кижучи *Oncorhynchus kisutch* в Хабаровском крае [Коцюк и др., 2024; Свиридов, Поваров, 2024; Свиридов и др., 2025].

Указанное направление развития метода является общим для большинства исследований в области беспилотного мониторинга [Свиридов и др., 2022а] и позволит в перспективе значительно повысить оперативность и стандартизацию обработки данных. Таким образом, основное преимущество метода учета лососей на основе аэрофотосъемки с БПЛА заключается в сочетании очень высокого разрешения, оперативности и возможности точечного обследования труднодоступных участков при относительно низких затратах.

Основными ограничениями метода являются: погодная зависимость; влияние растительности (затененность русел); ограниченный радиус действия БПЛА потребительского класса в условиях сложного рельефа и растительности; влияние прозрачности воды.

Выявленные нами ограничения, в частности критическая зависимость от погодных условий и степени сомкнутости крон деревьев, полностью согласуются с выводами других авторов, работавших в сходных ландшафтных условиях [Никифоров и др., 2023]. В частности, в некоторых водотоках Сахалина залесенность достигает 80 % и более, что делает традиционные методы учета и частично БПЛА-съемку потребительского класса малоэффективными и требует комбинирования с пешими маршрутами.

Полученные нами результаты подтверждают выводы, сделанные ранее [Свиридов и др., 2022б], о значительном влиянии залесенности на эффективность маршрутного учета на Сахалине. Однако, в отличие от предложенной в упомянутой работе альтернативы в виде учета на створе, наша адаптированная методика позволяет сохранить ключевое преимущество маршрутного метода — получение данных о пространственном распределении производителей по нерестилищам, что критически важно для оценки эффективности воспроизводства.

В качестве возможного решения выявленных ограничений при использовании беспилотных летательных аппаратов потребительского класса может рассматриваться применение БПЛА промышленного назначения. Использование аппаратов данного типа позволяет значительно расширить диапазон выполняемых работ и повысить устойчивость их функционирования в сложных метеорологических условиях. Вместе с тем следует учитывать, что эксплуатация и техническое обслуживание БПЛА промышленного класса требуют более высокой квалификации персонала и сопряжены с существенно большими финансовыми затратами, которые, однако, компенсируются многократно увеличенной суточной производительностью аэрофотосъемки.

Важно отметить, что получаемые ортофотопланы являются не только инструментом для подсчета численности производителей тихоокеанских лососей в морском прибрежье и нерестовых водотоках, но и ценным картографическим материалом. Они могут быть использованы для оценки морфометрических характеристик нерестилищ, состояния нерестовых бугров, картирования субстрата и топографии речных русел (плес, яма, перекат, завал).

Выводы

Разработанная и апробированная в течение трех полевых сезонов (2022–2024 гг.) методика аэрофотограмметрического мониторинга нерестовых скоплений тихоокеанских лососей с применением БПЛА потребительского класса доказала свою высокую эффективность и практическую значимость в условиях сложной топографии и плотной растительности в бассейнах рек Сахалинской области.

Установлены и проверены на практике оптимальные параметры аэросъемки (высота полета 20–100 м, скорость до 6 м/с, разрешение 1,0–1,5 см/пикс), обеспечивающие получение данных, пригодных для достоверной визуальной идентификации и подсчета производителей горбуши на нерестилищах.

Определены преимущества и области применения различных моделей БПЛА потребительского класса (DJI Matrice 300 RTK, DJI Phantom 4 Pro V2.0, DJI Mini 2) в зависимости от задач мониторинга и условий местности.

Подтверждено, что применение ручного режима пилотирования, несмотря на меньшую автоматизацию, позволяет повысить точность и надежность съемок в труднодоступных и залесенных руслах рек за счет гибкого маневрирования и оперативной адаптации к изменяющимся условиям.

Методика обеспечивает оперативное получение объективных данных о пространственном распределении и динамике нерестового хода, существенно снижает трудоемкость и материальные затраты на мониторинг по сравнению с традиционными наземными и авиационными методами.

Она является не просто репликацией существующих подходов, а их адаптацией и развитием применительно к сложной топографии Сахалина. Он занимает свою нишу между высокоавтоматизированными методами, применимыми на открытых участках [Свиридов и др., 2022а], и традиционными пешими обследованиями, необходимыми в условиях полной залесенности [Никифоров и др., 2023].

В целом предложенный способ является мощным, экономически целесообразным и перспективным инструментом для систематических исследований, мониторинга и обоснованного регулирования промысловый нагрузки на популяции тихоокеанских лососей.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность коллегам из Сахалинского филиала ВНИРО (СахНИРО) за помощь в проведении полевых работ. Отдельная благодарность В.Д. Никитину за организацию полевых исследований и А.А. Антонову за участие в параллельных пеших учетах. Особую признательность авторы выражают В.В. Свиридову за новаторские работы в области беспилотного мониторинга тихоокеанских лососей Дальнего Востока России, которые заложили методическую основу для настоящего исследования, а также за ценные практические рекомендации.

The authors thank their colleagues in the Sakhalin branch of VNIRO (SakhNIRO) for their assistance in field works, with special thanks to V.D. Nikitin for the surveys organizing and to A.A. Antonov for joining the parallel hiking surveys. The authors are particularly grateful to V.V. Sviridov for his pioneer achievements in unmanned monitoring of pacific salmon in the Russian Far East that became the methodological basement of this study, as well as for his valuable practical recommendations.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования.

The study had budget funding.

Соблюдение этических стандартов (COMPLIANCE WITH ETHICAL STANDARDS)

Все приемлемые национальные, институциональные и международные этические принципы соблюдены. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

All acceptable national, institutional and international ethical principles have been observed. The authors declare that they have no conflict of interests.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

А.А. Макоедов — концепция и дизайн исследования, разработка методики, планирование работ, анализ и интерпретация данных, написание и редактирование статьи. А.В. Скорик — сбор и обработка полевых материалов, проведение аэрофотосъемочных работ, подготовка графических материалов, написание разделов статьи. Н.В. Колпаков — общее руководство и координация научных исследований, обсуждение результатов, формулировка выводов, доработка первоначального варианта рукописи.

A.A. Makoedov — concept of the study, its conducting, methods development, work planning, data analysis and interpretation, the text writing. A.V. Skorik — collection and processing the materials, aerial photography, the text illustrating and writing certain sections. N.V. Kolpakov — general management and coordination of scientific researches, the study results discussing, the conclusions formulation, and revision the manuscript in editorial process.

Список литературы

Дуленин А.А., Дуленина П.А., Коцюк Д.В., Свиридов В.В. Опыт и перспективы использования малых беспилотных летательных аппаратов в морских прибрежных биологических исследованиях // Тр. ВНИРО. — 2021. — Т. 185. — С. 134–151. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-185-134-151.

Запорожец О.М., Запорожец Г.В. Использование фото- и видеофиксации для оценки количества производителей тихоокеанских лососей на нерестилищах и путях их миграций: некоторые методические подходы // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана. — 2017. — Вып. 47. — С. 77–90.

Запорожец О.М., Запорожец Г.В., Фельдман М.Г. Оценка численности производителей нерки и их распределение по нерестовым стациям в бассейне Начикинского озера (Камчатка) в 2019 г. // Изв. ТИНРО. — 2020. — Т. 200, вып. 3. — С. 618–634. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-618-634.

Колпаков Н.В., Макоедов А.А., Никитин В.Д. и др. Результаты промысла тихоокеанских лососей в Сахалино-Курильском регионе в 2024 году // Бюл. изучения тихоокеанских лососей

на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2025. — № 19. — С. 19–36. DOI: 10.26428/losos_bull19-2025-19-36. EDN: CFTFTI.

Коцюк Д.В., Свиридов В.В., Поваров А.Ю. Опыт реализации и способы дальнейшей автоматизации беспилотного учета тихоокеанских лососей в Охотском районе Хабаровского края // Изв. ТИНРО. — 2024. — Т. 204, вып. 3. — С. 705–721. DOI: 10.26428/1606-9919-2024-204-705-721. EDN: SJRXIS.

Макоедов А.А. Динамика численности тихоокеанских лососей российского происхождения в дальневосточном рыболовственном бассейне // Современные аспекты рыболовства и геномные технологии в аквакультуре и рыболовстве : мат-лы 4-й науч. школы-конф. мол. ученых и специалистов / под ред. М.В. Сытовой, Н.С. Мюге, И.И. Гордеева. — М. : ВНИРО, 2023. — С. 54.

Макоедов А.А. Доступность водных биологических ресурсов в Сахалино-Курильском регионе // Тихоокеанский лосось в мире человеческих взаимоотношений: экономических, социальных, экологических, исторических, этнических и культурных : тез. докл. Междунар. науч.-практ. семинара. — Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2019. — С. 74–76.

Макоедов А.А., Колпаков Н.В., Никитин В.Д. и др. Результаты хозяйственного освоения ресурсов тихоокеанских лососей Сахалино-Курильского региона в 2023 г. // Бюл. изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2024. — № 18. — С. 49–66. DOI: 10.26428/losos_bull18-2024-49-66. EDN: CIBDPD.

Макоедов А.А., Никитин В.Д., Живоглядов А.А. и др. Итоги промысла тихоокеанских лососей в Сахалино-Курильском регионе в 2022 г. // Бюл. № 17 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2023. — С. 57–68. DOI: 10.26428/losos_bull17-2023-57-68. EDN: SHCHSW.

Макоедов А.А., Никитин В.Д., Игнатьев Ю.И. и др. Итоги промысла горбуши и кеты в Сахалино-Курильском регионе в 2019 г. // Бюл. № 14 изучения лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО-центр, 2019. — С. 65–75.

Макоедов А.Н., Макоедов А.А. Динамика численности тихоокеанских лососей (*Oncorhynchus*, *Salmonidae*) российского происхождения и перспективы их добычи // Вестн. КамчатГТУ. — 2022а. — № 60. — С. 84–97. DOI: 10.17217/2079-0333-2022-60-84-97.

Макоедов А.Н., Макоедов А.А. Искусственное воспроизводство и состояние запасов тихоокеанских лососей // Изв. ТИНРО. — 2022б. — Т. 202, вып. 3. — С. 661–678. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-661-678.

Макоедов А.Н., Макоедов А.А. Использование запасов тихоокеанских лососей в Сахалинской области // Современные проблемы и перспективы развития рыболовства и рыбопромышленного комплекса : мат-лы 6-й науч.-практ. конф. мол. ученых с междунар. участием. — М. : ВНИРО, 2018. — С. 163–167.

Никифоров А.И., Гордеев И.И., Ридигер А.В. Мониторинговые исследования подходов производителей горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* с помощью БПЛА в нерестовых реках острова Сахалин в 2022 году // Бюл. № 17 изучения тихоокеанских лососей на Дальнем Востоке. — Владивосток : ТИНРО, 2023. — С. 115–121. DOI: 10.26428/losos_bull17-2023-115-121. EDN: TEKRFK.

Свиридов В.В., Коцюк Д.В., Подорожнюк Е.В. Беспилотный фотограмметрический учет тихоокеанских лососей посредством БПЛА потребительского класса // Изв. ТИНРО. — 2022а. — Т. 202, вып. 2. — С. 429–449. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-429-449.

Свиридов В.В., Подорожнюк Е.В., Никитин В.Д., Скорик А.В. Модификации беспилотного учета производителей тихоокеанских лососей в реках Сахалинской области и Хабаровского края // Изв. ТИНРО. — 2022б. — Т. 202, вып. 4. — С. 1015–1031. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-1015-1031. EDN: JULFRV.

Свиридов В.В., Поваров А.Ю. Применение методов искусственного интеллекта для автоматизации беспилотного учета отнерестившихся особей кеты в Хабаровском крае // Вопр. рыб-ва. — 2024. — Т. 25, № 4. — С. 113–124. DOI: 10.36038/0234-2774-2024-25-4-113-124.

Свиридов В.В., Поваров А.Ю., Коцюк Д.В. Автоматизация беспилотного учета производителей кеты и кижучи методами искусственного интеллекта // Изв. ТИНРО. — 2025. — Т. 205, вып. 3. — С. 518–534. DOI: 10.26428/1606-9919-2025-205-518-534. EDN: JCTWNA.

Фадеев Е.С., Шевляков Е.А., Фельдман М.Г. Комплексный мониторинг пропуска производителей тихоокеанских лососей р. Камчатка в режиме реального времени // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 197. — С. 3–20. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-197-3-20.

Groves P.A., Alcorn B., Wiest M.M. et al. Testing unmanned aircraft systems for salmon spawning surveys // Facets. — 2016. — Vol. 1. — P. 187–204. DOI: 10.1139/facets-2016-0019.

Harris J.M., Nelson J.A., Rieucau G., Broussard W.P. Use of unmanned aircraft systems in fishery science // *Trans. Am. Fish. Soc.* — 2019. — Vol. 148, Iss. 4. — P. 687–697. DOI: 10.1002/tafs.10168.

Harrison L.R., Legleiter C.J., Overstreet B.T. et al. Assessing the potential for spectrally based remote sensing of salmon spawning locations // *River Res. Applic.* — 2020. — Vol. 36, Iss. 8. — P. 1618–1632. DOI: 10.1002/rra.3690.

Kudo H., Koshino Y., Eto A. et al. Cost-effective accurate estimates of adult chum salmon, *Oncorhynchus keta*, abundance in a Japanese river using a radio-controlled helicopter // *Fish. Res.* — 2012. — Vol. 119–120. — P. 94–98. DOI: 10.1016/j.fishres.2011.12.010.

Ponsioen L., Kapralova K., Holm F. et al. Monitoring fish spawning sites in freshwater ecosystems using low-cost UAV data: A case study of salmonids in lakes in Iceland // *bioRxiv*. — 2021. — P. 1–22. DOI: 10.1101/2021.06.12.448199.

Roncoroni M., Lane S.N. A framework for using small Unmanned Aircraft Systems (sUASs) and SfM photogrammetry to detect salmonid redds // *Ecological Informatics*. — 2019. — Vol. 53. 100976. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2019.100976.

References

Dulenin, A.A., Dulenina, P.A., Kotsyuk, D.V., and Sviridov, V.V. Experience and perspectives of small unmanned aerial vehicles application for marine coastal biological studies, *Tr. Vses. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2021, vol. 185, pp. 134–151. doi 10.36038/2307-3497-2021-185-134-151

Zaporozhets, O.M. and Zaporozhets, G.V. Using the photo- and video records for assessment of pacific salmon escapement on migration routes and spawning grounds: some of methodical approaches, *Issled. Vodn. Biol. Resur. Kamchatki Sev.-Zapadn. Chasti Tikhogo Okeana*, 2017, no. 47, pp. 77–90.

Zaporozhets, O.M., Zaporozhets, G.V., and Feldman, M.G. Estimation of the number of sockeye salmon adults and their distribution by spawning stations in the basin of Lake Nachikinskoye (Kamchatka) in 2019, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 200, no. 3, pp. 618–634. doi 10.26428/1606-9919-2020-200-618-634

Kolpakov, N.V., Makoedov, A.A., Nikitin, V.D., Maznikova, O.A., Ignatiev, Y.I., and Antonov, A.A. Results of pacific salmon fishery in the Sakhalin-Kuril Region in 2024, in *Bulletin on the study of Pacific salmon in the Far East*, Vladivostok: TINRO, 2025, no. 19, pp. 19–36. doi 10.26428/losos_bull19-2025-19-36. EDN: CFTFTI.

Kotsyuk, D.V., Sviridov, V.V., and Povarov, A.Yu. Experience of implementation and approaches for further automation in unmanned aerial counting of pacific salmon in the Okhotsk district of Khabarovsk Region, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2024, vol. 204, no. 3, pp. 705–721. doi 10.26428/1606-9919-2024-204-705-721. EDN: SJRXIS.

Makoedov, A.A. Dynamics of the formation of Pacific salmon of Russian origin in the Far Eastern fishery basin, in *Mater. 4-й научн. shkoly-konf. mol. uchenykh i spetsialistov "Sovremennye aspeky rybokhozyaystvennoy nauki i genomnyye tekhnologii v akvakul'ture i rybolovstve"* (Proc. 4th Sci. Entific. Schools Pier. Scientists and Specialists "Modern aspects of fisheries science and genomic technologies in aquaculture and fisheries"), Sytova, M.V., Muge, N.S., Gordeev, I.I., eds, Moscow: VNIRO, 2023, pp. 54.

Makoedov, A.A. Access to aquatic biological resources in the Sakhalin-Kuril region, *Theses of reports from the International Scientific and Practical Seminar "Pacific Salmon in the World of Human Relations: Economic, Social, Environmental, Historical, Ethnic, and Cultural Aspects"*, Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2019, pp. 74–76.

Makoedov, A.A., Kolpakov, N.V., Nikitin, V.D., Zhivoglyadov, A.A., Ignatiev, Y.I., and Antonov, A.A. Results of economic usage of the pacific salmon resources in the Sakhalin-Kuril region in 2023, in *Bulletin on the study of Pacific salmon in the Far East*, Vladivostok: TINRO, 2024, no. 18, pp. 49–66. doi 10.26428/losos_bull18-2024-49-66. EDN: CIBDPD.

Makoedov, A.A., Nikitin, V.D., Zhivoglyadov, A.A., Ignatiev, Y.I., and Antonov, A.A. Results of the pacific salmon fishery in the Sakhalin-Kuril region in 2022, in *Byulleten' no. 17 izucheniya tikhookeanskih lososei na Dal'nem Vostoke* (Bulletin No. 17 for the Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO, 2023, pp. 57–68. DOI: 10.26428/losos_bull17-2023-57-68. EDN: SHCHSW.

Makoedov, A.A., Nikitin, V.D., Ignatiev, Yu.I., Antonov, A.A., and Kovtun, M.V. Results of the pink salmon and chum salmon fishery in the Sakhalin-Kuril region in 2019, in *Byull. N 14 izucheniya tikhookeanskih lososei na Dal'nem Vostoke* (Bull. No. 14 Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO-Tsentr, 2019, pp. 65–75.

Makoedov, A.N. and Makoedov, A.A., Population dynamics and catch prospects of russian pacific salmon (*Oncorhynchus*, *Salmonidae*), *Vestn. Kamchatskogo Gos. Tekh. Univ.*, 2022, no. 60, pp. 84–97. doi 10.17217/2079-0333-2022-60-84-97

Makoedov, A.N. and Makoedov, A.A., Pacific salmon: the status of stocks and prospects for the fishery, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2022, vol. 48, no. 7, pp. 547–554. doi 10.1134/s1063074022070112

Makoyedov, A.N. and Makoyedov, A.A., Use of Pacific salmon stocks in the Sakhalin region, in *Mater. 6 nauchno-prakt. konf. molodykh uchenykh s mezhdunar. uchastiyem "Sovremennyye problemy i perspektivy razvitiya rybokhozyaystvennogo kompleksa"* (Proc. 6th Sci.-Pract. Conf. Young Sci. Int. Participation “Modern problems and prospects for the development of the fishery complex”), Moscow: VNIRO, 2018, pp. 163–167.

Nikiforov, A.I., Gordeev, I.I., and Ridiger, A.V., Monitoring survey on run of spawners of pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha* by means of UAV in the spawning rivers of Sakhalin Island in 2022, in *Bull. N 17 izucheniya tikhookeanskikh lososei na Dal'nem Vostoke* (Bull. No. 17 Study of Pacific Salmon in the Far East), Vladivostok: TINRO, 2023, pp. 115–121. doi 10.26428/losos_bull17-2023-115-121. EDN: TEKRFK.

Sviridov, V.V., Kotsyuk, D.V., and Podorozhnyuk, E.V., Photogrammetric counts of pacific salmon using consumer-grade unmanned aerial vehicles, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2022, vol. 48, no. 7, pp. 587–600. doi 10.1134/s1063074022070136

Sviridov, V.V., Podorozhnyuk, E.V., Nikitin, V.D., and Skorik, A.V., Modifications of unmanned aerial survey on spawners of pacific salmons in the rivers of Sakhalin and Khabarovsk Regions, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 4, pp. 1015–1031. doi 10.26428/1606-9919-2022-202-1015-1031. EDN: JULFRV.

Sviridov, V.V. and Povarov, A.Yu., Application of artificial intelligence methods to automate post-spawn chum salmon individuals enumeration by means of unmanned aerial vehicles in Khabarovsk Territory, *Vopr. Rybolov.*, 2024, vol. 25, no. 4, pp. 113–124. doi 10.36038/0234-2774-2024-25-4-113-124

Sviridov, V.V., Povarov, A.Yu., and Kotsyuk, D.V., Automation of unmanned counting for spawners of chum and coho salmon with methods of artificial intelligence, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2025, vol. 205, no. 3, pp. 518–534. doi 10.26428/1606-9919-2025-205-518-534. EDN: JCTWNA.

Fadeev, E.S., Shevlyakov, E.A., and Feldman, M.G., Integrated Monitoring of Escapement of Pacific Salmon Spawners to the Kamchatka River in Real-Time Mode, *Russ. J. Mar. Biol.*, 2019, vol. 45, no. 7, pp. 546–559. doi 10.1134/S1063074019070022

Groves, P.A., Alcorn, B., Wiest, M.M., Maselkobc, J.M., and Connor, W.P., Testing unmanned aircraft systems for salmon spawning surveys, *Facets*, 2016, vol. 1, pp. 187–204. doi 10.1139/facets-2016-0019

Harris, J.M., Nelson, J.A., Rieucau, G., and Broussard, W.P., Use of unmanned aircraft systems in fishery science, *Trans. Am. Fish. Soc.*, 2019, vol. 148, no. 4, pp. 687–697. doi 10.1002/tafs.10168

Harrison, L.R., Legleiter, C.J., Overstreet, B.T., Bell, T.W., and Hannon, J., Assessing the potential for spectrally based remote sensing of salmon spawning locations, *River Res. Applic.*, 2020, vol. 36, no. 8, pp. 1618–1632. doi 10.1002/rra.3690

Kudo, H., Koshino, Y., Eto, A., Ichimura, M., and Kaeriyama, M., Cost-effective accurate estimates of adult chum salmon, *Oncorhynchus keta*, abundance in a Japanese river using a radio-controlled helicopter, *Fish. Res.*, 2012, vol. 119–120, pp. 94–98. doi 10.1016/j.fishres.2011.12.010

Ponsioen, L., Kapralova, K., Holm, F., Martínez, S.G., and Hennig, B.D., Monitoring fish spawning sites in freshwater ecosystems using low-cost UAV data: A case study of salmonids in lakes in Iceland, *bioRxiv*, 2021, pp. 1–22. doi 10.1101/2021.06.12.448199

Roncoroni, M. and Lane, S.N., A framework for using small Unmanned Aircraft Systems (sUASs) and SfM photogrammetry to detect salmonid redds, *Ecological Informatics*, 2019, vol. 53, 100976. doi 10.1016/j.ecoinf.2019.100976

Поступила в редакцию 17.11.2025 г.

После доработки 1.12.2025 г.

Принята к публикации 3.12.2025 г.

*The article was submitted 17.11.2025; approved after reviewing 1.12.2025;
accepted for publication 3.12.2025*