

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ
METHODS OF INVESTIGATIONS**

Научная статья

УДК 597.552.511:57.087.3**DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-429-449****EDN: CNQHAF****БЕСПИЛОТНЫЙ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЙ УЧЕТ
ТИХООКЕАНСКИХ ЛОСОСЕЙ ПОСРЕДСТВОМ БПЛА
ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО КЛАССА**

В.В. Свиридов, Д.В. Коцюк, Е.В. Подорожнюк*
Хабаровский филиал ВНИРО (ХабаровскНИРО),
680038, г. Хабаровск, Амурский бульвар, 13а

Аннотация. Разработана методика беспилотного фотограмметрического учета тихоокеанских лососей посредством беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) потребительского класса. Она основана на оценке численности производителей и нерестовых бугров посредством фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, отснятых БПЛА на контрольных участках, и анализе в геоинформационных системах (ГИС) фотограмметрических продуктов — ортофотопланов и цифровых моделей рельефа (ЦМР). Оценки относительной численности на контрольных участках предлагается экстраполировать на пригодную для нереста площадь водотоков соответствующего бассейна для расчета общей численности. Впервые установлено, что ЦМР дна водотоков дают возможность визуализировать и подсчитывать бугры. Приведено подробное описание элементов методики: планирования работ, выполнения съемки, обработки материалов, оценки численности, анализа, визуализации и веб-публикации. Приведены рекомендации по выбору БПЛА и вспомогательного оборудования, а также полетного, фотограмметрического и геоинформационного программного обеспечения (ПО). Предлагаемый подход будет способствовать объективизации учета лососей, постепенному переходу с субъективных аэровизуальных методов оценки численности на доказательную и проверяемую цифровую основу.

Ключевые слова: тихоокеанские лососи, нерестилища, нерестовые бугры, БПЛА, фотограмметрия, ортофотоплан, ГИС

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

* Свиридов Владимир Владимирович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, vladimir.sviridov.1974@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6060-1532; Коцюк Денис Владимирович, кандидат биологических наук, руководитель филиала, dk-fish@mail.ru; Подорожнюк Елена Владимировна, заведующая лабораторией, Podorozhnyuk-tinro@yandex.ru.

Photogrammetric counts of pacific salmon by means of unmanned aerial vehicles of consumer grade

Vladimir V. Sviridov*, Denis V. Kotsyuk**, Elena V. Podorozhnyuk***

*, **, *** Khabarovsk branch of VNIRO (KhabarovskNIRO),
13a, Amursky Boulevard, Khabarovsk, 680038, Russia

* Ph.D., leading researcher, vladimir.sviridov.1974@yandex.ru

** Ph.D., director, dk-fish@mail.ru

*** head of laboratory, Podorozhnyuk-tinro@yandex.ru

Abstract. Methodology for photogrammetric counting of pacific salmon by means of unmanned aerial vehicles (UAVs) of consumer grade is developed. The spawners and spawning redds are counted using photogrammetric processing of aerial images taken by UAVs at monitoring sites. The photogrammetric products (orthomosaics and digital elevation models — DEMs) are analyzed in geographic information systems (GIS). The estimations of relative abundance for the monitoring sites are extrapolated to entire area of potential spawning grounds. There is shown for the first time that DEMs of water channels allow to visualize and count the redds. Detailed description of methodology is presented, including the survey planning and implementation, data processing, fish abundance estimation, data analysis and visualization, and web-publication. Recommendations for choosing UAV, its accessories and software for flight, photogrammetry and GIS are provided. This approach will facilitate objectivity of salmon counts and provide gradual transition from subjective aerovisual methods towards proven and verified digital basis of fish abundance assessment.

Keywords: pacific salmon, spawning grounds, salmon redd, UAV, photogrammetry, orthomosaic, GIS

For citation: Sviridov V.V., Kotsyuk D.V., Podorozhnyuk E.V. Photogrammetric counts of pacific salmon by means of unmanned aerial vehicles of consumer grade, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2022, vol. 202, no. 2, pp. 429–449. DOI: 10.26428/1606-9919-2022-202-429-449. EDN: CNQHAF.

Введение

Аэровизуальные наблюдения с пилотируемых летательных аппаратов (ПЛА) многие десятилетия применяются для учета производителей тихоокеанских лососей и других водных биоресурсов [Крогиус, 1955; Остроумов, 1970; Евзеров, 1983; Hill, 1997; Фадеев и др., 2019; Шевляков и др., 2019; Шевляков, Шубкин, 2020]. Их использование помогает оценить состояние запасов лососей, повысить качество перспективных прогнозов, обоснованность и оперативность принимаемых при регулировании путины управленческих решений.

Прогресс в сфере беспилотных летательных аппаратов (БПЛА, беспилотники, дроны) и фотограмметрического программного обеспечения (ПО) в последнее десятилетие сделал возможным экономичные беспилотные обследования нерестилищ лососевых рыб посредством БПЛА потребительского класса [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; Ponsioen et al., 2021]. За редкими исключениями беспилотный учет лососей проводится беспилотниками потребительского класса, тогда как БПЛА промышленного сегмента для таких целей практически не применяются ввиду сложностей с эксплуатацией и организацией работ, а также дороговизны оборудования. По конструкции БПЛА, используемые для учета лососей, в подавляющем большинстве относятся к вертолетному типу (квадрокоптерам). Такие аппараты дешевле и проще в эксплуатации, чем беспилотники самолетного типа.

Уровень технического исполнения в публикациях по беспилотному обследованию нерестилищ лососевых рыб варьирует от начального, основанного на беспилотной съемке в режиме ручного управления оператором, не предусматривающего фотограмметрической обработки снятых материалов [Kudo et al., 2012; Groves et al., 2016; Фадеев

и др., 2019; Запорожец и др., 2020; Ponsioen et al., 2021], до высокотехнологичного, базирующегося на автоматических (выполняемых в режиме автопилота) полетных миссиях (далее по тексту — миссии), фотограмметрических и геоинформационных технологиях [Harris et al., 2019; McKenna et al., 2019; Roncoroni, Lane, 2019; Свиридов, Золотухин, 2020; Harrison et al., 2020]. Высокотехнологичная обработка материалов беспилотной съемки предусматривает создание на их основе фотограмметрических продуктов — ортофотопланов и цифровых моделей рельефа (ЦМР), служащих основой для подсчета объектов в ГИС. Такой вариант оценки численности далее по тексту именуется беспилотным фотограмметрическим учетом, так как именно беспилотные и фотограмметрические технологии являются его основой.

Фотограмметрия — научно-техническая дисциплина, занимающаяся определением формы, размеров, положения и иных характеристик произвольных объектов по их фотоизображениям, полученным при съемке*. Изначально методы фотограмметрии были разработаны для решения задач геодезии, в последние годы исследователи стали адаптировать их для беспилотного учета водных биоресурсов [Joyce et al., 2018; Raoult et al., 2020; Дуленин и др., 2021; Методические рекомендации..., 2021].

Ортофотоплан — высокодетальное цифровое изображение местности, созданное посредством фотограмметрических методов по перекрывающимся фотоснимкам, полученным в ходе беспилотной или пилотируемой съемки*. В отличие от космоснимков, ортофотопланы намного точнее позиционированы на местности и характеризуются сверхвысоким пространственным разрешением (вплоть до 1 мм/пикс), тогда как разрешение современных космоснимков не превышает 30 см/пикс. Благодаря высокому пространственному разрешению и точной географической привязке ортофотопланы можно анализировать в геоинформационном ПО для подсчета производителей, сненки и нерестовых бугров (далее по тексту — бугры) лососевых рыб, а также для измерения длин и площадей.

ЦМР создаются аналогичным образом и также анализируются средствами ГИС. Они представляют собой матрицу высот отснятой территории, при этом каждому пикселю соответствует определенное значение высоты поверхности рельефа над уровнем моря.

В ряде публикаций [Joyce et al., 2018; Barnas et al., 2020] показана важность детального документирования беспилотных методов для их успешного внедрения в практику учета биологических ресурсов. В настоящее время в открытой печати отсутствуют публикации, развернуто описывающие методику беспилотного фотограмметрического учета лососей. Методические рекомендации если и приводятся, то являются фрагментарными, бессистемными, а потому трудновоспроизводимыми. По другим видам водных биоресурсов методики беспилотного фотограмметрического учета хоть и опубликованы, но по большей части неполны или не могут быть применены к учету производителей лососей без существенной доработки [Duffy et al., 2018, 2020; Joyce et al., 2018; Raoult et al., 2020; Дуленин и др., 2021; Методические рекомендации..., 2021]. По этим причинам, несмотря на широкие технические возможности технологий беспилотной съемки, их внедрение для учета гидробионтов в российском рыбохозяйственном НИИ идет медленно.

Потребность в эффективной, экономичной, несложной, детально задокументированной методике беспилотного фотограмметрического учета лососей явилась основанием для настоящей работы. Выработанная методика представляет технологию фотограмметрического учета лососей посредством БПЛА потребительского класса, воспроизводимую полевыми сотрудниками рыбохозяйственного НИИ, не требующую привлечения дорогостоящих дронов промышленного сегмента и профессиональных операторов.

* Руководство пользователя Agisoft Metashape: Professional Edition, версия 1.7. СПб.: ООО Agisoft, 2021. 211 с.

Материалы и методы

Основой для отработки методики послужили материалы, собранные сотрудниками ХабаровскНИРО в 2020 и 2021 гг. в ходе беспилотной фото- и видеосъемки контрольных участков водотоков Хабаровского края в период нереста кеты и горбуши (рис. 1). В ряде случаев беспилотная съемка была синхронизирована с традиционными ежегодными маршрутными обследованиями нерестилищ с берега и плавсредств.

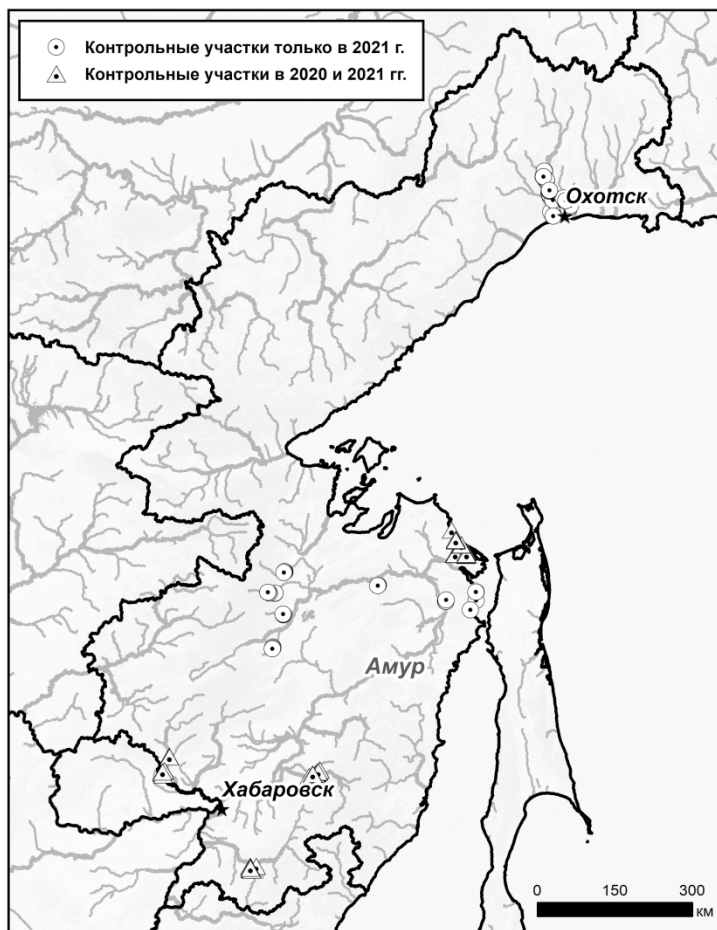


Рис. 1. Расположение контрольных участков, обследованных с помощью БПЛА в 2020–2021 гг.

Fig. 1. Location of the monitoring sites surveyed by UAVs in 2020–2021

Для разработки методики учета был протестирован и применен на практике широкий спектр беспилотного оборудования, вспомогательных технических средств, а также мобильного, настольного и серверного ПО. При оценке характеристик ПО проводили консультации с потенциальными пользователями разрабатываемой методики на предмет простоты эксплуатации и удобства интерфейса. Оценивали скорость, качество сбора и обработки материалов съемки в программном обеспечении, стоимость и стабильность работы ПО, требования к вычислительной технике, соответствие программного обеспечения политике импортозамещения в сфере государственных закупок.

В отличие от аэровизуального учета с ПЛА, беспилотники потребительского класса ввиду технических ограничений не способны обеспечить тотальный учет нерестовых водотоков. Поэтому беспилотный учет вели выборочно, на контрольных участках, являющихся типичными, отражающими величину подходов в соответствующий

бассейн [Инструкция..., 1987*; Dunham et al., 2001; Isaak, Thurow, 2006; Johnson et al., 2007; Золотухин, 2019]. Для расчета общей численности значения плотности производителей и бугров на контрольных участках, полученные посредством беспилотного фотограмметрического учета, экстраполировали на пригодную для нереста площадь водотоков соответствующего бассейна.

Для заблаговременного выбора контрольных участков использовали литературные данные [Золотухин, 2019] и материалы ранее проведенных исследований. Отбирали участки с приемлемыми условиями съемки: хорошей транспортной доступностью, достаточной прозрачностью, небольшой глубиной, малой облесенностью и турбулентностью течения, межгодовой стабильностью береговой линии и т.д.

Всего был обследован 91 контрольный участок, выполнено 130 миссий, снято 170,2 км водотоков, сделано 69,2 тыс. снимков. Ряд участков был обследован в нескольких повторностях за сезон для анализа временной динамики заполнения нерестилищ, имеющей большое значение для оценок относительной численности. По результатам каждой миссии подготовлены ортофотопланы с общей площадью снятой акватории, равной 3,764 млн м², при разрешении 1–2 см/пикс.

Так как целью работы была выработка максимально упрощенной и доступной методики, при выборе БПЛА остановились на потребительских квадрокоптерах, которые согласно вышеприведенным публикациям хорошо зарекомендовали себя для беспилотного учета лососей: DJI Phantom 4 Pro V2.0, DJI Mavic 2 Pro и DJI Mini 2 [Фадеев и др., 2019; McKenna et al., 2019; Дуленин и др., 2021]. До отбытия в район работ проводили подготовку и тестирование беспилотного оборудования, обучение исполнителей. Тестирование беспилотного оборудования заключалось в проведении миссий, имитирующих запланированные, и оценке снятых материалов.

Для качественной съемки в ходе автоматических миссий использовали специализированное ПО, управляющее БПЛА и фотографированием при минимальном участии оператора. Полетная программа устанавливалась на мобильное устройство, которое подключалось кабелем к пульту управления (ПУ) беспилотника. Выполнение автоматической миссии определялось параметрами полета и съемки, задаваемыми оператором: траекторией, высотой и скоростью полета, периодичностью фотографирования, перекрытием снимков, настройками камеры и т.д. До отбытия в район работ настраивали параметры предстоящих миссий для каждого контрольного участка и сохраняли на мобильном устройстве в виде файла настроек. Для автоматического выполнения съемки участка оператор, прибыв на место работ, загружал в полетное ПО файл настроек и запускал выполнение миссии. В экспедиционных условиях было протестировано лидирующее полетное ПО для автоматических миссий: Map Pilot Pro, Pix4Dcapture, Drone Harmony, DroneDeploy, DroneLink, Litchi, DJI GS Pro и DJI Pilot. Для ручных миссий использовали функционал штатного ПО для аппаратов производства DJI: DJI GO 4 и DJI Fly.

Для перемещения между контрольными участками использовали наземный и водный транспорт. По прибытии на участок проводили развертывание БПЛА, его диагностику и запуск, выполняли съемку, скачивали снятые материалы, при необходимости оперативно проверяли их качество, после чего передислоцировались на следующий участок.

Мобильную ГИС использовали для записи GPS-треков экспедиционной группы, создания векторных объектов с атрибутивными и фотографическими описаниями контрольных участков, а также для оперативной корректировки полетных заданий. Применяли мобильную ГИС NextGIS Mobile для Android-устройств, хорошо зарекомендовавшую себя для учета лососей [Свиридов, Золотухин, 2020].

* Инструкция о порядке проведения обязательных наблюдений за дальневосточными лососевыми на КНС и КНП бассейновых управлений рыбоохраны и стационарах ТИНРО. Владивосток: ТИНРО, 1987. 23 с.

Материалы съемки посредством фотограмметрического ПО преобразовывали в ортофотопланы и ЦМР. Фотограмметрическая обработка снимков базируется на автоматической обработке фотоматериалов, отснятых на нужной высоте и с заданным взаимным пересечением. ПО находит общие точки на перекрывающихся снимках, посредством триангуляции строит трехмерную модель поверхности и далее сшивает все снимки в единое геореферированное изображение. Для отбора ПО, наиболее подходящего для фотограмметрической обработки, провели тестирование лидирующего в этой сфере ПО: Agisoft Metashape Professional, Pix4Dmapper, Bentley ContextCapture, Trimble Inpho, RealityCapture, 3DF Zephyr и WebODM.

В качестве настольной ГИС использовали NextGIS QGIS для Windows, а для создания Веб-ГИС применяли серверную ГИС NextGIS Web. Выбор в пользу данного программного обеспечения связан с тем, что ранее проведенные работы показали эффективность настольного, серверного и мобильного геоинформационного ПО от ООО «НекстГИС» для учета лососей [Свиридов, Золотухин, 2020]. В настольной ГИС проводили векторизацию фотограмметрических продуктов для получения оценок относительной численности на контрольных участках. Эти оценки на участках использовали для расчета общей численности для соответствующего бассейна.

Учетные сведения, карты относительной численности и фотограмметрические продукты систематизировались в настольной ГИС и при наличии интернет-покрытия публиковались в виде Веб-ГИС на базе серверной ГИС NextGIS Web. Для оперативного регулирования промысла и информационного обеспечения прогнозирования участникам рыбохозяйственного регулирования посредством веб-браузера предоставлялся удаленный защищенный доступ к созданной Веб-ГИС. Учитывая объективные требования к оперативности учета, стремились провести весь цикл работ максимально быстро, по возможности в экспедиционных условиях.

Результаты и их обсуждение

Большой объем выполненных экспедиционных и камеральных работ, а также сравнительная оценка результатов, полученных посредством различных подходов, разнообразного программного обеспечения и оборудования, позволили выработать оптимальную, на наш взгляд, методику беспилотного фотограмметрического учета лососей посредством БПЛА потребительского класса. Для наглядного представления данной методики ниже приведена диаграмма связей, описывающая последовательность ее этапов и составляющих элементов (рис. 2).

Предлагаемая технологическая цепочка представляет собой комплекс беспилотного оборудования, ПО, кадровых ресурсов, расчетных процедур и организационных мероприятий. Несмотря на многоступенчатость и высокую технологичность предлагаемого подхода, он технически доступен полевому работнику без специальных навыков.

Ввиду большого количества и разнообразия элементов методики невозможно рассмотреть их в данной публикации с полной детализацией. Поэтому далее рассмотрены основные составляющие методики. Обеспечение полной документированности предлагаемого подхода планируется авторами посредством издания в будущем специальных развернутых методических рекомендаций.

Подготовка в НИИ. Для обеспечения максимального качества снимков при съемке в сложных условиях работы предпочтительны беспилотники с камерами, обладающими наибольшим физическим размером матрицы и механическим затвором. Соответственно, Phantom 4 Pro V2.0, оснащенный механическим затвором, предпочтительнее Mavic 2 Pro. Последняя модель оборудована электронным затвором, поэтому дает качественные результаты лишь при хорошей освещенности нерестовых водотоков, что наблюдается нечасто. Что же касается DJI Mini 2, то из-за сниженных технических характеристик этот квадрокоптер следует использовать лишь для разведывательных полетов или при невозможности применения других моделей. DJI Mini 2 дает возможность предельно

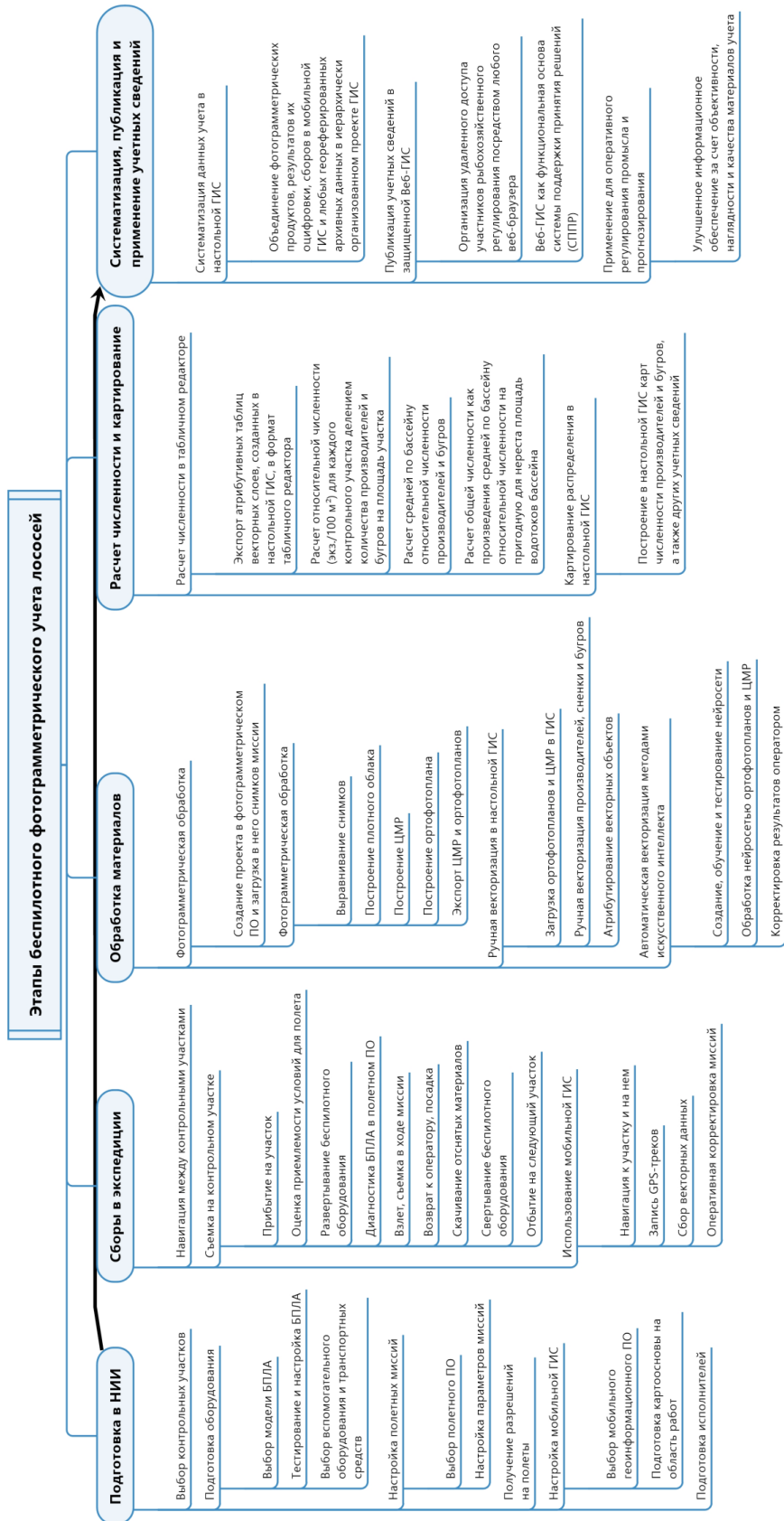


Рис. 2. Этапы беспилотного фотограмметрического учета тихоокеанских лососей
Fig. 2. Stages of photogrammetric counting by UAV for pacific salmon

оперативного проведения коротких разведывательных полетов для рекогносцировки на местности. Это обеспечивается удобным форм-фактором и малыми размерами этого аппарата, позволяющими быстро запускать беспилотник в сложных условиях.

Желательно оснащать БПЛА радиомаяками, это снижает вероятность потери беспилотного оборудования, позволяет обнаруживать дрон на удалении до нескольких километров в случае аварийного падения не в воду. Рюкзаки для переноски, в отличие от кейсов из комплекта, удобны для транспортировки по пересеченной местности. Для комфортной работы оператора желательно использование полетного ПО на мобильных устройствах с ярким крупным экраном, защищенным солнцезащитным козырьком от бликов.

Оптимален следующий комплект беспилотного оборудования экспедиционной группы: 1) квадрокоптеры — 3 шт. (Phantom 4 Pro V2.0 — 2 шт., DJI Mini 2 — 1 шт.); 2) радиомаяк — 1 шт. на каждый квадрокоптер; 3) запасные батареи — в зависимости от интенсивности съемки и возможности оперативной зарядки от 5 до 10 шт.; 4) зарядные устройства — 2 шт.; 5) бензиновый электрогенератор — 1 шт.; 6) пропеллеры запасные — 4 шт.; 7) карты памяти UHS Class 3 от 32 Гб, со скоростью записи от 90 Мбайт/с — 2 шт.; 8) рюкзак для переноски квадрокоптера — 2 шт.; 9) гермомешок для защиты квадрокоптера от влаги и пыли — 2 шт.; 10) солнцезащитный козырек для ПУ — 2 шт.; 11) iOS-устройства для полетного ПО на iOS (iPad mini 2019 и выше) — 2 шт.; 12) Android-устройства для мобильной ГИС и полетного ПО на Android — 2 шт.

Для ручных миссий хорошо подходит бесплатное ПО DJI GO 4 для iOS- и Android-устройств. Ручные миссии посредством Mini 2 приемлемо проводить бесплатным ПО DJI Fly для iOS- и Android-устройств, являющимся видоизмененным вариантом DJI GO 4.

Среди протестированного полетного ПО для выполнения автоматических миссий рекомендуется использовать платное ПО Map Pilot Pro для iOS-устройств. Map Pilot Pro для iOS-устройств выделяется среди прочих протестированных программ тем, что позволяет резервировать на мобильном устройстве космоснимки и ЦМР для последующих полевых работ вне зоны интернет-покрытия, проводить съемку с учетом изменчивости рельефа, а также характеризуется оптимальным соотношением стоимости подписки и функционала. Drone Harmony для Android-устройств обладает близким к Map Pilot Pro функционалом при более высокой стоимости подписки. Также на Android-устройствах хорошо зарекомендовали себя бесплатные программы DJI Pilot и Pix4Dcapture, обладающие, однако, меньшим набором функций.

Помимо полетного ПО, для повышения эффективности учета можно использовать вспомогательные программы и веб-сервисы. Например, применение веб-сервисов airdata.com или dronelogbook.com для анализа логов полетов позволяет улучшить качество и безопасность миссий, обеспечить доказательность их выполнения.

Сборы в экспедиции. Получение качественных снимков производителей и бугров намного сложнее, чем наземных объектов. Это связано с сильным поглощением света водой, маскирующей окраской рыб, наличием донной растительности, малой освещенностью учитываемых объектов, бликами, рябью, турбулентностью, мутностью, сомкнутостью леса, высококонтрастными тенями, присутствием хищных птиц и т.д. Эти обстоятельства осложняют получение качественных снимков и обеспечение сохранности беспилотника.

По прибытии на участок необходимо оценить условия съемки и при необходимости скорректировать настройки заранее подготовленной миссии (рис. 3, а). Для предотвращения загрязнения оптики БПЛА желательно запускать с руки и сажать в ладонь с тщательным обеспечением безопасности оператора (рис. 3, б). Выполняя миссию, важно внимательно отслеживать поступающие с беспилотника видеосигнал и телеметрию для обеспечения безопасности полета (рис. 3, в).

В средних широтах съемки желательно начинать не ранее одного часа после восхода и заканчивать не позднее одного часа до заката. Участки с пониженной освещен-



Рис. 3. Работа оператора БПЛА на контрольном участке: ситуационная корректировка настроек миссии в полетном ПО Map Pilot Pro (а), запуск беспилотника из позиции удержания одной рукой (б), отслеживание поступающего видеосигнала и телеметрии для обеспечения безопасности полета (в)

Fig. 3. UAV operator actions at the monitoring site: situational correction of the mission parameters in Map Pilot Pro application (а), launch of drone (б), monitoring of incoming video signal and telemetry to support the flight safety (в)

ностью водотока желательно обследовать ближе к полудню. Полет на высоте около 50 м от земли дает разрешение на местности, достаточное для учета лососей (около 1,5 см/пикс), и обеспечивает безопасное расстояние до деревьев. Разрешение снимка на местности при заданной высоте полета удобно рассчитывать в онлайн-калькуляторах. Например, согласно веб-ресурсам <https://leapingwing.co.uk/gsd-calculator> и <https://www.handalselaras.com/calculator> для Phantom 4 Pro V2.0 при высоте съемки 50 м разрешение снимков на местности будет 1,4 см/пикс. Следует избегать полетов над водотоками вблизи древесной растительности ввиду их аварийной опасности, так как съемка в нади́р ограничивает визуальный контроль за окружением, а датчики препятствий БПЛА недостаточно чувствительны для обнаружения тонких веток без листьев. При низкой береговой растительности на протяжении всего контрольного участка можно снизить высоту полета для получения фотограмметрических продуктов с более высоким разрешением на местности.

Для повышения темпов учета при съемке лучше использовать один пролет вдоль центральной линии водотока с продольным пересечением снимков не менее 85 %. Для учета снимки на берегах и компенсации геометрических искажений по краям фотограмметрических продуктов в кадр должно попадать не менее 5 м берега помимо акватории контрольного участка. С учетом этих требований при пролете над центральной линией водотока на высоте 50 м можно отснять водотоки шириной до 40–50 м.

Если в приоритете безопасность оборудования и устранение рисков падения в воду, а не производительность, то следует использовать пролет над обоими берегами: удаление от оператора вдоль одного берега водотока, возвращение вдоль другого. В таком случае продольное пересечение должно быть не менее 80, поперечное (между берегами) — не менее 40 %. Данные пересечения значительно ниже принятых в геодезии ввиду сниженных требований к пространственной точности фотограмметрических продуктов для учета лососей. Избыточная доля пересечения значительно удлинит съемку, т.е. снизит производительность учета, при этом не увеличит ощутимо его качество.

При съемке важно использовать компенсацию изменчивости рельефа (выдерживание заданной высоты полета относительно поверхности), она нужна для повышения качества съемки и безопасности полета. Автоматическая компенсация изменчивости рельефа возможна лишь в автоматических режимах. В ручном исполнении корректировка делается оператором по визуальным ориентирам и картооснове мобильной ГИС.

Для обеспечения достаточного качества снимков необходимо правильно настраивать параметры камеры: наименьшая светочувствительность (ISO 100) — для минимизации оптических шумов, максимально открытая диафрагма ($f/2,8$) — для наибольшей освещенности матрицы. Выдержка подбирается с учетом освещенности водных объектов при текущих погодных условиях, выставляется в полетном ПО на основе качества изображения, передаваемого с БПЛА. Использование значительно удлиненной выдержки может потребоваться при сложных условиях съемки: плотной низкой облачности, позднем или раннем времени суток, сильной облесенности узких водотоков, сильно отражающих свет объектах на берегах (например снег). Обоснованное удлинение выдержки неизбежно приведет к снижению скорости полета беспилотника и уменьшению суточной производительности съемки, но оно необходимо для соблюдения качества.

Скорость полета БПЛА подбирается так, чтобы смаз снимка был меньше или равен его разрешению на местности, иначе фотографии будут нечеткими. Максимальная допустимая скорость полета беспилотника рассчитывается как отношение разрешения снимка на местности к выдержке. Например, если разрешение на местности 1,4 см/пикс и выдержка 1/160, то максимальная скорость составит $1,4/(1/160)$, т.е. 2,24 м/с. Для качественной съемки нерестовых водотоков квадрокоптерами потребительского класса обычно подходит скорость 2–3 м/с. Съемка водных объектов на значительно большей скорости возможна лишь в солнечные дни или путем перехода на БПЛА промышленного класса, оснащенные высокочувствительными камерами. Однако, как уже упоминалось выше, в настоящее время для учета лососей БПЛА промышленного сегмента практически не применяются ввиду объективных сложностей.

Погодные условия через освещенность определяют как производительность съемки, так и ее возможность в принципе. Освещенность водотока является важнейшим фактором скорости съемки участков. Понижение освещенности из-за облачности замедляет съемку, а при осадках, тумане, паводке и сильном ветре съемка невозможна. Суточная производительность беспилотного учета складывается из скорости съемки участков и времени на перемещение между ними.

Благодаря тому что автоматические миссии полностью контролируются полетным ПО и не требуют участия оператора, их можно выполнять за пределами зоны действия пульта управления. Поэтому автоматические миссии производительнее ручных за счет большего радиуса работ (5 км от точки взлета вместо 1,0–1,5) и увеличенной скорости полета. При автоматических миссиях скорость съемки участков обычно 1–5 км протяженности водотока за час работ (в среднем — 3 км) в зависимости от условий съемки. При ручных миссиях производительность съемки участка обычно 1–3 км/ч (в среднем — 2 км), в зависимости от опыта оператора и условий съемки. Тем не менее ручные миссии являются качественной альтернативой автоматическим и, как показали

наши работы и исследования других авторов, могут использоваться для получения приемлемых фотограмметрических продуктов [Dickens et al., 2021].

Приблизительная оценка среднесуточной производительности беспилотного учета: 5 контрольных участков или 8 км водотоков, 3 ч — работа на участках, 6 ч — перемещение между ними. На практике объемы суточной производительности колеблются в очень широком диапазоне в зависимости от условий съемки и пространственной разнесенности участков — от 2 до 20 км водотоков.

Обработка материалов. Первый этап обработки материалов беспилотной съемки проводится в фотограмметрическом ПО. В ходе тестирования лидирующего программного обеспечения для фотограмметрической обработки остановили выбор на Agisoft Metashape Professional от российского разработчика ООО «Геоскан», наилучшим образом соответствующем выдвигаемым требованиям: оптимальное соотношение стоимости и функционала, соответствие государственной политике импортозамещения в сфере закупок ПО. Pix4Dmapper и Bentley ContextCapture от зарубежных разработчиков близки по функционалу и пригодности для учета лососей. Свободное фотограмметрическое ПО (например WebODM) на данный момент не обладает достаточной производительностью и качеством обработки. Для качественной и оперативной обработки материалов беспилотного учета рекомендуем использовать высокопроизводительные ноутбуки с характеристиками не ниже следующих: процессор — 6 ядер с частотой 2,6 ГГц, оперативная память — DDR4 24 Гб, дискретная видеокарта 8 Гб, внутренний SSD диск 500 Гб.

Ортофотопланы, создаваемые в ходе фотограмметрической обработки, при разрешении около 1,5 см/пикс и качественно выполненной съемке позволяют четко визуализировать, подсчитывать и измерять производителей, сненку и бугры (рис. 4). Визуальный анализ производителей и сненки, а также их промеры дают возможность дифференцировать кету и горбушу.

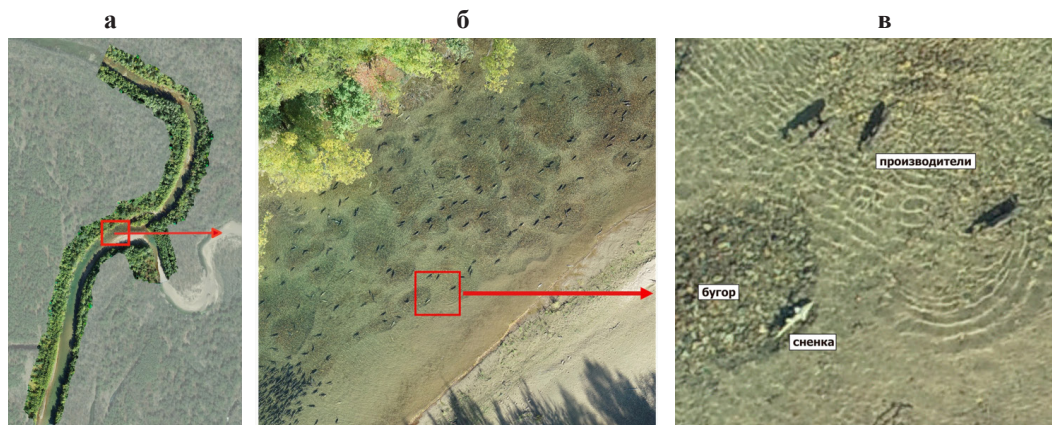


Рис. 4. Внешний вид производителей, сненки и бугров кеты (р. Кухтуй, сентябрь 2021 г.): ортофотоплан с подложенным космоснимком (а); увеличенный фрагмент ортофотоплана (б); дополнительно увеличенный фрагмент ортофотоплана (в)

Fig. 4. Chum salmon spawners, post-spawners and redds (Kukhtuy River, September 2021) on orthomosaic with underlying satellite image (а) and on magnified parts of the orthomosaic (б, в)

В ходе учетных работ нами было обнаружено, что помимо производителей, сненки и бугров на ортофотопланах хорошо визуализируются незаконный, несообщаемый и нерегулируемый промысел (ННН-промысел), хищники-потребители, особенности фоновых условий и другие важные элементы условий воспроизводства лососей (рис. 5).

ЦМР, второй фотограмметрический продукт, позволяют уточнить и дополнить сведения, получаемые при анализе ортофотопланов. Нами впервые установлено, что ЦМР водотоков позволяют эффективно визуализировать и проводить поштучный учет бугров лососей. Ранее европейскими исследователями была показана возможность

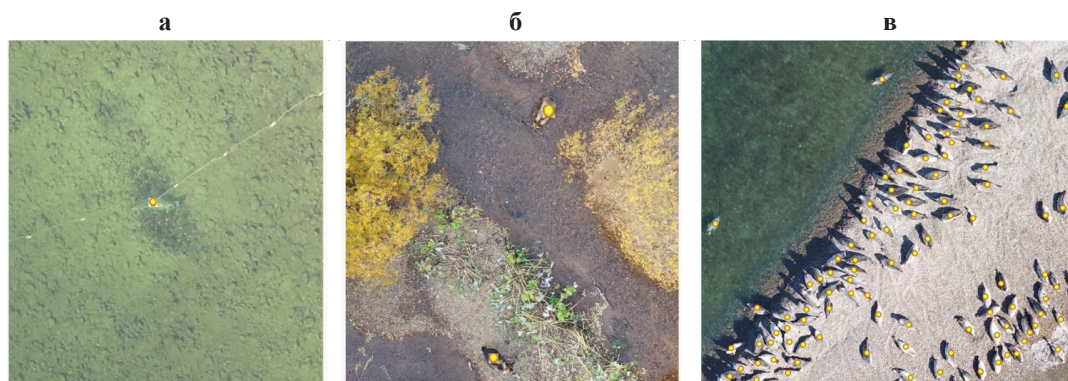


Рис. 5. Визуализация на ортофотопланах условий воспроизводства лососей: ННН-промысел кеты на нерестилищах р. Урми (а); бурые медведи на нерестилище кеты в р. Иска (б); скопления ларги в устье р. Охота в период нерестовой миграции лососей (в). Точками векторизованы отдельные особи

Fig. 5. Some special cases of salmon spawning on orthomosaics: poaching on chum salmon at the Upmi spawning grounds (a); brown bears at the Iska spawning grounds of chum salmon (б); spotted seal aggregation in the Okhota estuary during spawning migration of salmon (в). The salmon individuals are marked by vector points

выявления бугров кумжи по динамике ЦМР, однако это иной подход, основанный на сопоставлении нескольких цифровых моделей рельефа, полученных в динамике, в разные периоды нереста [Roncoroni, Lane, 2019]. Новизна наших результатов в том, что показана возможность четкой визуализации и подсчета бугров на ЦМР, полученной по материалам разовой беспилотной съемки. Бугры визуализируются на ЦМР как возвышенности характерной формы и размеров как при полноценной трехмерной визуализации, так при псевдотрехмерной (отрисовке с помощью отмывки рельефа) (рис. 6).

Возможность подсчета бугров на ортофотопланах ранее показана для ряда видов лососевых [McKenna et al., 2019; Ponsioen et al., 2021]. По нашим наблюдениям качество учета по ЦМР обычно значительно выше такового по ортофотопланам благодаря улучшенной визуализации (рис. 6). Для учета производителей и сненки подходят только ортофотопланы, на ЦМР они не различимы. Однако ЦМР и ортофотопланы дополняют друг друга и должны использоваться совместно при учете бугров. Например, бугры зачастую хорошо видны на ЦМР в условиях пониженной освещенности и теней, препятствующих качественной визуализации на ортофотопланах. С другой стороны, на участках с турбулентностью бугры хуже видны на ЦМР, но хорошо различимы на ортофотопланах. Учет бугров по ЦМР существенно легче для их скоплений, чем для одиночных. Визуализация бугров по ЦМР может быть затруднена в случае обильной водной растительности или большой изменчивости микрорельефа дна, характерной для узких, извилистых проток.

При достаточной обеспеченности электричеством для повышения оперативности возможна фоновая обработка снятых за день материалов в ночной период с помощью полностью автоматизированного, не требующего присутствия оператора режима работы Agisoft Metashape Professional. На высокопроизводительном ноутбуке возможно использование многопоточной обработки: запуск сразу нескольких копий ПО, одновременно проводящих фоновую обработку. Оперативная обработка в экспедиционных условиях может использоваться для ускоренного выявления некачественно отлетанных миссий с целью их повторного выполнения до отбытия с контрольного участка. На высокопроизводительном ноутбуке обработка 2 тыс. снимков линейных миссий, покрывающих 6 км протяженности водотока, занимает около 4 ч. Даже при очень высоком суточном объеме съемки (несколько тысяч снимков) его можно полно-

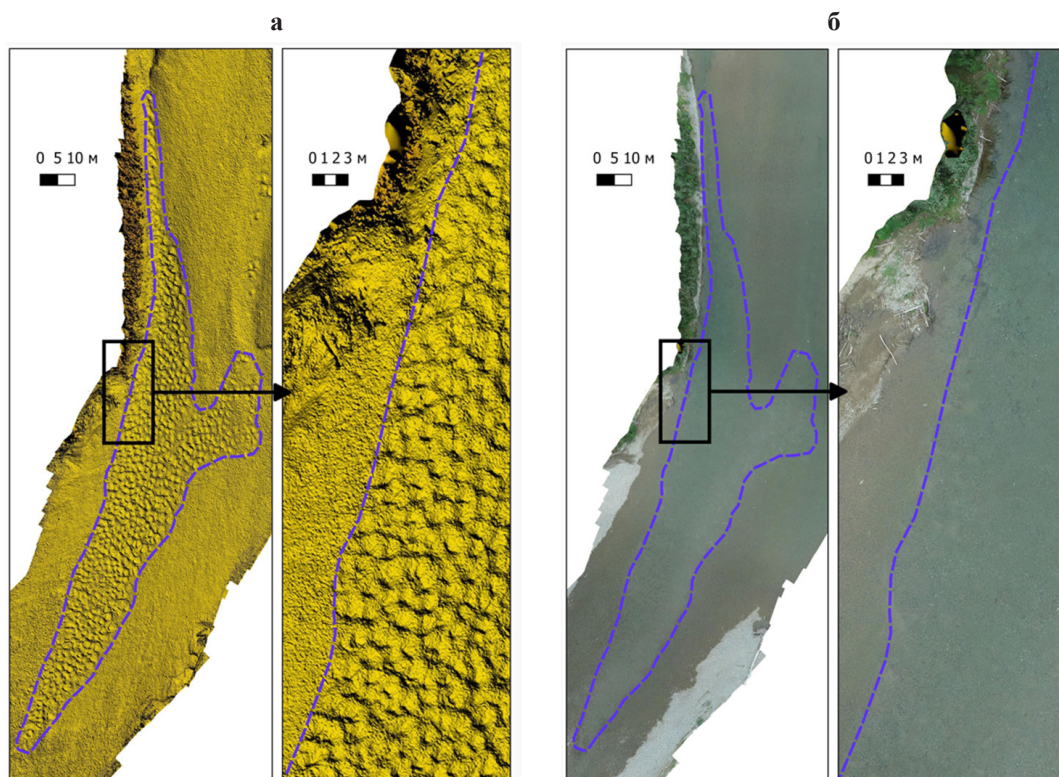


Рис. 6. Внешний вид бугров горбуши (р. Урак, сентябрь 2021 г.) на ЦМР, отображенной с помощью отмывки рельефа (а), на ортофотоплане (б). Синяя линия — граница скопления бугров

Fig. 6. Pink salmon redds (Urak River, September 2021) on DEM depicted with shaded relief (а) and on orthomosaic (б). Blue line bounds the area with high distribution density of the redds

стью обработать в фотограмметрическом ПО посредством многопоточной пакетной обработки за одну ночь, сразу после дня работ.

Второй этап обработки материалов беспилотной съемки проводится в настольном геоинформационном ПО. Ортофотопланы и ЦМР в виде растровых слоев загружают в проект настольной ГИС. Оператор начинает сеанс редактирования и выполняет ручную оцифровку (векторизацию) ортофотопланов и ЦМР. Данный режим оцифровки именуется ручным, так как оператор лично, не автоматически оцифровывает видимые на растрах объекты учета, щелкая на каждый из них инструментами редактирования настольной ГИС. Каждый вид объектов учета оцифровывается в собственном векторном слое с точечной геометрией. Производители и сненка векторизуются по ортофотопланам, а бугры — преимущественно по ЦМР со вспомогательным использованием ортофотопланов. При необходимости создаваемые векторные объекты дополняются атрибутивными характеристиками.

Темпы такой оцифровки невелики. При среднесуточной производительности аэро-съемки, равной 8 км водотоков, трудозатраты на ручную оцифровку по очень приближенным оценкам составят 4 человеко-часа (из расчета 0,5 человеко-часа на 1 км отснятого водотока). Значительно ускоренной, хотя и загроможденной альтернативой, может быть визуальная (на глаз) экспресс-оценка численности объектов на ортофотоплане и ЦМР, имитирующая аэровизуальный учет с ПЛА, но проводимая оператором не в полете, а в процессе оперативного просмотра в настольной ГИС. Такая экспресс-оценка в случае вынужденного использования в экспедиционных условиях должна корректироваться стандартной обработкой в НИИ.

Обработка методами искусственного интеллекта (ИИ) может стать ускоренной альтернативой ручной оцифровке в геоинформационном ПО. Результаты обработки методами ИИ те же, что и при ручной оцифровке: векторные слои с определенным видом объектов. При адекватной настройке нейросетей и высоком качестве ортофотопланов и ЦМР методы ИИ способны значительно ускорить оцифровку, повысить оперативность беспилотного учета и снизить трудозатраты.

Оператор настраивает инструменты ИИ под распознавание определенного вида объектов, проводит обучение нейросети и тестирует точность распознавания. При достаточной точности проводится пакетная обработка ортофотопланов и ЦМР настроенными инструментами ИИ. Результаты автоматического распознавания объектов корректируются оператором вручную (удаление ложных срабатываний, оцифровка пропущенных объектов).

Для качественного учета производителей, сненки и бугров методами ИИ они должны быть четко различимы на материалах съемки, характеризоваться относительно стабильными визуальными характеристиками, четко отличающими их от других элементов снимка. Нами был протестирован ряд ПО с функционалом ИИ (ArcGIS Pro, Erdas Imagine, ENVI Deep Learning и т.д.), получены предварительные обнадеживающие результаты, говорящие о применимости нейросетей для автоматической векторизации производителей и сненки при условии высокого качества материалов съемки. Однако текущие технические возможности беспилотной техники потребительского класса не в полной мере удовлетворяют условию высокого качества материалов съемки для применения ИИ. По мере совершенствования БПЛА и соответствующего повышения качества материалов съемки применимость ИИ для беспилотного учета лососей будет возрастать.

Расчет численности и картирование. Последовательность действий по расчету численности производителей и бугров включает: 1) экспорт результатов векторизации из настольной ГИС в формат табличного редактора (например, MS Excel); 2) вычисление относительной численности для каждого контрольного участка как отношения числа оцифрованных объектов к отснятой площади; 3) расчет общей численности путем экстраполяции относительной численности на пригодную для нереста площадь водотоков соответствующего бассейна (см. рис. 2).

Для перехода от относительного обилия на контрольных участках к общей численности необходимы сведения о площади водотоков бассейна, пригодной для нереста, полученные заблаговременно, до беспилотного учета (архивные сведения, результаты предыдущих исследований и т.д.). К сожалению, сведения о площади водотоков определенного бассейна, пригодной для нереста, зачастую неточны или отсутствуют, что осложняет оценку общей численности. В таком случае экстраполяционные коэффициенты можно рассчитать опосредованно, например как отношение общей численности, определенной аэровизуальными или гидроакустическими методами, к средней плотности на контрольных участках по данным беспилотного учета.

Карты относительной численности на участках, построенные в настольной ГИС, полезны для визуального анализа результатов беспилотного учета и проведения межгодовых сравнений. Например, относительная численность бугров кеты на контрольных участках в бассейне р. Анюй в 2021 г. была существенно ниже, чем в 2020 г. (рис. 7).

Значения плотности на контрольных участках могут служить индексом численности подходов в речной бассейн и применяться для межгодовых сравнений. Например, очевидно резкое снижение относительной численности бугров на участках бассейна р. Анюй в 2021 г. по сравнению с 2020 г.: соответственно Аджу 3 — 0,16 и 3,06, Холи — 0,07 и 0,25, Мухе — 0,04 и 0,79 шт./100 м² (рис. 8).

Систематизация, публикация и применение учетных сведений. Использование настольных и серверных ГИС для систематизации данных беспилотного учета,



Рис. 7. Относительная численность бугров кеты (шт./100 м²) по данным беспилотного фотограмметрического учета на контрольных участках в бассейне р. Анюй в октябре 2020 (оранжевые кружки и числа) и 2021 гг. (синие кружки и числа). Желтые линии — участки, черные надписи — их названия

Fig. 7. Distribution density of chum salmon redds (number per 100 m²) according to photogrammetric counts by means of UAVs at monitoring sites in the Anuiy River in October 2020 (orange circles) and 2021 (pink circles). The sites are bounded by yellow lines and labeled

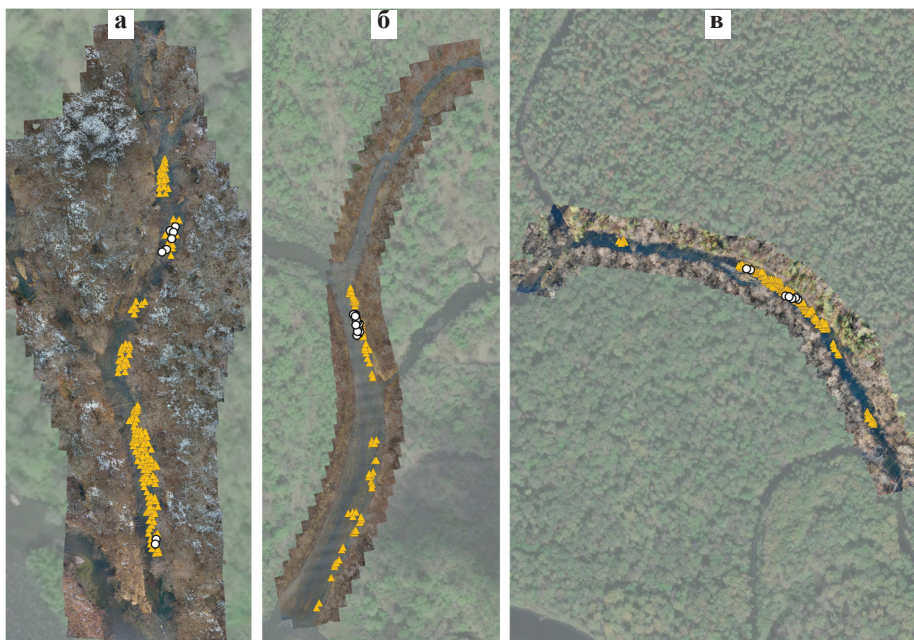


Рис. 8. Ортофотопланы с подложенными космоснимками контрольных участков в бассейне р. Анюй в октябре 2020 и 2021 гг.: Аджу 3 (а), Холи (б), Мухе (в). Векторизованные бугры кеты для 2020 г. обозначены треугольниками, для 2021 г. — кругами

Fig. 8. Orthomosaics with underlying satellite image for monitoring sites in the tributaries of the Anuiy River in October of 2020 and 2021: the Ajou 3 (a), Kholi (b), and Mukhe (v). The vectorized chum salmon redds are shown by triangles (2020) and circles (2021)

их веб-публикаций в интернете и ускоренного применения на практике является важной частью предлагаемой методики. Для максимальной отдачи от проводимого беспилотного учета требуется не просто его качественная реализация, но и оперативное и доступное представление учетных сведений всем авторизованным участникам рыбохозяйственного регулирования.

Объединение фотограмметрических продуктов, результатов их оцифровки, сборов мобильной ГИС и прочих геореферированных архивных данных в иерархически организованном проекте настольной геоинформационной системы обеспечивает их систематизацию, сохранность, доступность для оперативного статистического и пространственного анализа. Слои группируются с учетом их пространственно-временной и объектной принадлежности и логики оптимальной визуализации.

В ходе учетных работ 2020 и 2021 гг. использовали выборочную веб-публикацию учетных материалов в виде защищенной Веб-ГИС на базе ПО NextGIS Web. При наличии интернет-покрытия выгрузку материалов в Веб-ГИС проводили уже в экспедиционных условиях. Авторизованные участники рыбохозяйственного регулирования получали оперативный удаленный доступ к ней посредством веб-браузера. Интуитивно понятный интерфейс Веб-ГИС позволяет привлекать к анализу материалов беспилотного учета лиц без специальных технических навыков. В ней доступны базовые инструменты для работы с пространственными данными: переключение слоев, измерение площадей и расстояний, просмотр атрибутов объектов, поиск по характеристикам и т.д. (рис. 9). Такая Веб-ГИС может рассматриваться как функциональная основа, как прототип системы поддержки принятия решений (СППР) для учета и регулирования промысла лососей.

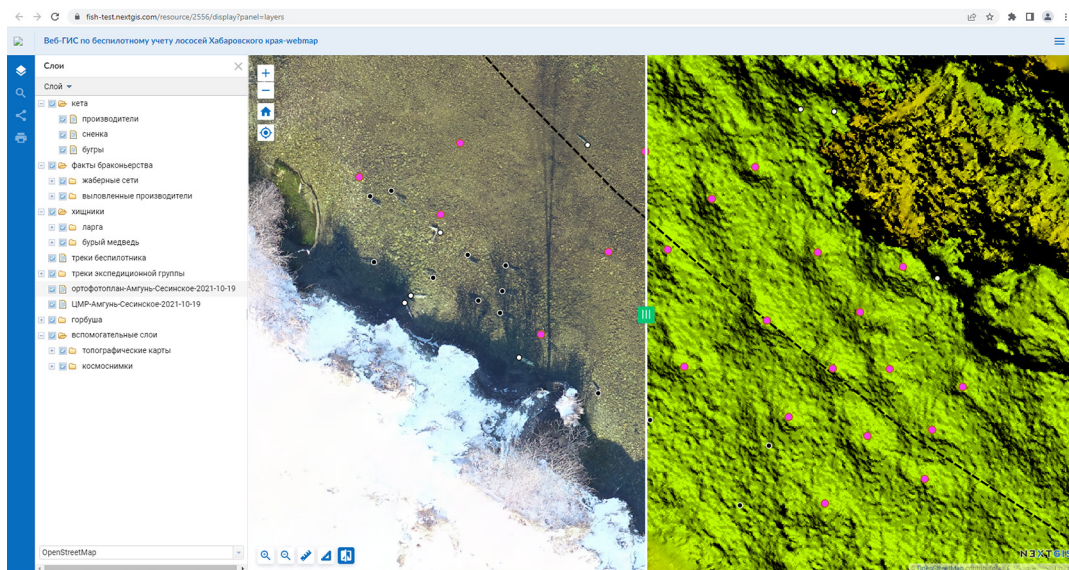


Рис. 9. Пример веб-публикации материалов беспилотного фотограмметрического учета (ЦМР нерестилища кеты на р. Амгунь в октябре 2021 г.) в формате защищенной Веб-ГИС на базе ПО NextGIS Web, доступной по паролю через веб-браузер

Fig. 9. Example of UAV-based photogrammetric counts in web-publication presented in format of password-protected Web-GIS created with NextGIS Web software — DEMs for the Amgun spawning grounds of chum salmon in October 2021

Заключение

В представленной работе предложена методика беспилотного фотограмметрического учета лососей при помощи беспилотников потребительского класса, доступная полевым сотрудникам рыбохозяйственного НИИ без специальных технических на-

выков, внедренная в ХабаровскНИРО. Разработанный нами подход по применению беспилотных, фотограмметрических и геоинформационных технологий в целях учета лососей является системой технических средств, ПО, расчетных алгоритмов и организационных мероприятий, объединенных в единое функциональное целое.

Беспилотная съемка, фотограмметрическая обработка полученных материалов и их анализ в ГИС позволяют оперативно и экономично получать высококачественные сведения о локализации, заполнении и других характеристиках нерестилищ, важные для управления запасами лососей. Выявленная нами возможность эффективной визуализации и подсчета бугров по ЦМР повышает качество беспилотного учета. Дополнительным преимуществом внедрения беспилотного фотограмметрического учета является оперативная веб-публикация фотограмметрических продуктов, карт и оценок численности в формате Веб-ГИС, обеспечение удаленного доступа экспертам для улучшенной рыбохозяйственной эксплуатации тихоокеанских лососей.

Предложенная методика является качественным рабочим вариантом, но будет постепенно дополняться введением новых инструментальных, программных и организационных составляющих по мере технического прогресса в сфере БПЛА, ПО для фотограмметрии, ГИС и ИИ. Разработанную методику можно трансформировать в варианты, адаптированные под другие виды гидробионтов и рыбохозяйственные задачи.

Можно представить, что основным фактором развития беспилотного фотограмметрического учета лососей будет постепенный переход от выборочных оценок дронами потребительского класса к тотальным, посредством промышленных БПЛА. Стабильный рост технических возможностей экономичных беспилотников потребительского класса, наблюдающийся в последние годы, сохранит их значимость для задач учета лососей и других видов ВБР в локальных районах воспроизводства.

Благодарности (ACKNOWLEDGEMENTS)

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику Хабаровского филиала ВНИРО (ХабаровскНИРО) к.б.н. А.А. Дуленину за ценные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению работы.

Authors are grateful to Ph.D. A.A. Dulenin, leading researcher of Khabarovsk branch of VNIRO (KhabarovskNIRO) for his valuable comments and recommendations useful for the article improvement.

Финансирование работы (FUNDING)

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования.
The study has 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 applicable national, institutional and international ethical guidelines are implemented.

The authors declare that they have no conflict of interests.

Информация о вкладе авторов (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

В.В. Свиридов — сбор и обработка данных, анализ результатов, написание статьи; Д.В. Коцюк — планирование работ, анализ результатов, написание статьи; Е.В. Подорожнюк — планирование работ, сбор и обработка данных, анализ результатов, написание статьи.

V.V. Sviridov — data collection and processing, results analysis, text writing and illustration; D.V. Kotsyuk — survey planning, results analysis, text writing; E.V. Podorozhnyuk — survey planning, data collection and processing, results analysis, text writing.

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.

Евзеров А.В. Нерестовый фонд охотоморской и анадырской кеты // Биологические основы развития лососевого хозяйства в водоемах СССР. — М.: Наука, 1983. — С. 103–113.

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. DOI: 10.15853/2072-8212.2017.47.77-90.

Запорожец О.М., Запорожец Г.В., Фельдман М.Г. Оценка численности производителей нерки и их распределение по нерестовым станциям 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.

Золотухин С.Ф. Обоснование выбора рек для мониторинга запасов кеты и горбуши р. Амур // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 199. — С. 19–34. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-199-19-34.

Крогиус Ф.В. Опыт применения самолета для обследования состояния и оценки заполнения нерестилищ камчатских лососей // Рыб. хоз-во. — 1955. — № 11. — С. 32–34.

Методические рекомендации по проведению учета приплода байкальской нерпы (*Pusa sibirica*) с беспилотных летательных аппаратов в Байкальском рыбохозяйственном бассейне / сост. В.А. Бизиков, В.А. Петерфельд, В.И. Черноок и др. — М.: ВНИРО, 2021. — 56 с.

Остроумов А.Г. Результаты аэровизуального учета и аэрофотосъемки красной и ее нерестилищ в бассейне озера Курильского // Изв. ТИНРО. — 1970. — Т. 78. — С. 17–32.

Свиридов В.В., Золотухин С.Ф. Методы ГИС для инвентаризации нерестилищ тихоокеанских лососей р. Амур // Изв. ТИНРО. — 2020. — Т. 200, вып. 3. — С. 730–746. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-730-746.

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.

Шевляков Е.А., Фельдман М.Г., Островский В.И. и др. Ориентиры и оперативная оценка пропуска производителей на нерестилища как инструменты перспективного и краткосрочного управления запасами тихоокеанских лососей в реках Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна // Изв. ТИНРО. — 2019. — Т. 196. — С. 23–62. DOI: 10.26428/1606-9919-2019-196-23-62.

Шевляков Е.А., Шубкин С.В. Современный опыт обследования нерестилищ тихоокеанских лососей в водоемах Чукотки // Изв. ТИНРО. — 2020. — Т. 200, вып. 2. — С. 270–291. DOI: 10.26428/1606-9919-2020-200-270-291.

Barnas A.F., Chabot D., Hodgson A.J. et al. A standardized protocol for reporting methods when using drones for wildlife research // J. Unmanned Veh. Syst. — 2020. — Vol. 8, № 2. — P. 89–98. DOI: 10.1139/juvs-2019-0011.

Dickens J., Hollyman P.R., Hart T. et al. Developing UAV Monitoring of South Georgia and the South Sandwich Islands' Iconic Land-Based Marine Predators // Front. Mar. Sci. — 2021. — Vol. 8. — P. 1–16. DOI: 10.3389/fmars.2021.654215.

Duffy J.P., Anderson K., Shapiro A.C. et al. Drone technologies for conservation. — Gland: WWF conservation technology series, 2020. — 123 p.

Duffy J.P., Cunliffe A.M., DeBell L. et al. Location, location, location: considerations when using lightweight drones in challenging environments // Remote Sensing in Ecology and Conservation. — 2018. — Vol. 4, № 1. — P. 7–19. DOI: 10.1002/rse2.58.

Dunham J., Rieman B., Davis K. Sources and Magnitude of Sampling Error in Redd Counts for Bull Trout // N. Am. J. Fish. Manag. — 2001. — Vol. 21, Iss. 2. — P. 343–352. DOI: 10.1577/1548-8675(2001)021<0343:SAMOSE>2.0.CO;2.

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., Rieucan 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.
- Hill R.A.** Optimizing aerial count frequency for the area-under-the-curve method of estimating escapement // *N. Am. J. Fish. Manage.* — 1997. — Vol. 17. — P. 461–466.
- Isaak D.J., Thurow R.F.** Network-scale spatial and temporal variation in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) redd distributions: patterns inferred from spatially continuous replicate surveys // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* — 2006. — Vol. 63, № 2. — P. 285–296. DOI: 10.1139/f05-214.
- Johnson D.H., Shrier B.M., O'Neal J.S. et al.** Salmonid Field Protocols Handbook. Techniques for Assessing Status and Trends in Salmon and Trout Populations. — Bethesda : American Fisheries Society, 2007. — 478 p.
- Joyce K.E., Duce S., Leahy S.M. et al.** Principles and practice of acquiring drone-based image data in marine environments // *Mar. Freshw. Res.* — 2018. — Vol. 70, № 7. — P. 952–963. DOI: 10.1071/MF17380.
- 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.
- McKenna B., Parkyn D., Lecours V. et al.** Drones: a new technique for monitoring salmon spawning escapements // *Newsletter of the Alaska Chapter, American Fisheries Society.* — 2019. — Vol. 39, № 4. — P. 1–6.
- 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.
- Raoult V., Colefax A.P., Allan B.M. et al.** Operational Protocols for the Use of Drones in Marine Animal Research // *Drones.* — 2020. — Vol. 4, Iss. 4. — P. 1–35. DOI: 10.3390/drones4040064.
- 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
- Evzerov, A.V.,** Spawning fund of the Okhotsk and Anadyr chum salmon, in *Biologicheskiye osnovy razvitiya lososevogo khozyaystva v vodoyemakh SSSR* (Biological foundations of the development of salmon farming in the reservoirs of the USSR), Moscow: Nauka, 1983, pp. 103–113.
- 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, vol. 47, pp. 77–90. doi 10.15853/2072-8212.2017.47.77-90
- 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
- Zolotukhin, S.F.,** Basis for selection of rivers for monitoring on the stocks of chum and pink salmon in the Amur River, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 199, pp. 19–34. doi 10.26428/1606-9919-2019-199-19-34
- Krogius, F.V.,** Application experience for investigating the state and assessing the filling of spawning grounds of Kamchatka salmon, *Rybn. Khoz.*, 1955, no. 11, pp. 32–34.
- Bizikov, V.A., Peterfeld, V.A., Chernook, V.I., Kuznetsov, N.V., Petrov, E.A., Bobkov, A.I., Tkachev, V.V., Sidorov, L.K., and Boltnev, E.A.,** *Metodicheskiye rekomendatsii po provedeniyu ucheta priploda baykal'skoy nerpy (Pusa sibirica) s bespilotnykh letatel'nykh apparatov v Baykal'skom rybokhozyaystvennom bassejne* (Methodological recommendations for the accounting of the offspring of the Baikal seal (*Pusa sibirica*) from unmanned aerial vehicles in the Baikal fishery basin), Moscow: VNIRO, 2021.

Ostroumov, A.G., The results of aerial visual accounting and aerial photography of red and its spawning grounds in the basin of Lake Kurilskoye, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 1970, vol. 78, pp. 17–32.

Sviridov, V.V. and Zolotukhin, S.F., Gis methods for inventory of pacific salmons spawning grounds in the Amur River, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 200, no. 3, pp. 730–746. doi 10.26428/1606-9919-2020-200-730-746

Fadeev, E.S., Shevlyakov, E.A., and Feldman, M.G., Complex monitoring of salmon spawners escapement to the Kamchatka River in real time regime, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 197, no. 2, pp. 3–20. doi 10.26428/1606-9919-2019-197-3-20

Shevlyakov, E.A., Feldman, M.G., Ostrovsky, V.I., Volobuev, V.V., Kaev, A.M., Golub, E.V., Barabanshchikov, E.I., and Golovanov, I.S., Limits and operational evaluation of the spawners escapement to the spawning grounds as tools for prospective and short-term management of the pacific salmon stocks in the rivers of the Far-Eastern fisheries Basin, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2019, vol. 196, pp. 23–62. doi 10.26428/1606-9919-2019-196-23-62

Shevlyakov, E.A. and Shubkin, S.V., Recent experience of surveying the spawning grounds of pacific salmons in the water bodies of Chukotka, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2020, vol. 200, no. 2, pp. 270–291. doi 10.26428/1606-9919-2020-200-270-291

Barnas, A.F., Chabot, D., Hodgson, A.J., Johnston, D.W., Bird, D.M., and Ellis-Felege, S.N., A standardized protocol for reporting methods when using drones for wildlife research, *J. Unmanned Veh. Syst.*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 89–98. doi 10.1139/juvs-2019-0011

Dickens, J., Hollyman, P.R., Hart, T., Clucas, G.V., Murphy, E.J., Poncet, S., Trathan, P.N., and Collins, M.A., Developing UAV Monitoring of South Georgia and the South Sandwich Islands' Iconic Land-Based Marine Predators, *Front. Mar. Sci.*, 2021, vol. 8, pp. 1–16. doi 10.3389/fmars.2021.654215

Duffy, J.P., Anderson, K., Shapiro, A.C., Avino, F.S., DeBell, L., and Glover-Kapfer, P., *Drone technologies for conservation*, Gland: WWF conservation technology series, 2020.

Duffy, J.P., Cunliffe, A.M., DeBell, L., Sandbrook, C., Wich, S.A., Shutler, J.D., Myers-Smith, I.H., Varela, M.R., and Anderson, K., Location, location, location: considerations when using lightweight drones in challenging environments, *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 7–19. doi 10.1002/rse2.58

Dunham, J., Rieman, B., and Davis, K., Sources and Magnitude of Sampling Error in Redd Counts for Bull Trout, *N. Am. J. Fish. Manag.*, 2001, vol. 21, no. 2, pp. 343–352. doi 10.1577/1548-8675(2001)021<0343:SAMOSE>2.0.CO;2

Groves, P.A., Alcorn, B., Wiest, M.M., Maselkobe, 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., Rieucan, 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

Hill, R.A., Optimizing aerial count frequency for the area-under-the-curve method of estimating escapement, *N. Am. J. Fish. Manage.*, 1997, vol. 17, pp. 461–466.

Isaak, D.J. and Thurow, R.F., Network-scale spatial and temporal variation in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) redd distributions: patterns inferred from spatially continuous replicate surveys, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2006, vol. 63, no. 2, pp. 285–296. doi 10.1139/f05-214

Johnson, D.H., Shrier, B.M., O'Neal, J.S., Knutzen, J.A., Augerot, X., O'Neal, T.A., and Pearsons, T.N., *Salmonid Field Protocols Handbook. Techniques for Assessing Status and Trends in Salmon and Trout Populations*, Bethesda: American Fisheries Society, 2007.

Joyce, K.E., Duce, S., Leahy, S.M., Leon, J., and Maier, S.W., Principles and practice of acquiring drone-based image data in marine environments, *Mar. Freshw. Res.*, 2018., vol. 70, no. 7, pp. 952–963. doi 10.1071/MF17380

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

McKenna, B., Parkyn, D., Lecours, V., Stark, C., and Lepping, B., Drones: a new technique for monitoring salmon spawning escapements, *Newsletter of the Alaska Chapter, American Fisheries Society*, 2019, vol. 39, no. 4, pp. 1–6.

Ponsioen, L., Kapralova, K., Holm, F., Martinez, S.G., and Henning, 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

Raoult, V., Colefax, A.P., Allan, B.M., Cagnazzi, D., Castelblanco-Martínez, N., Ierodiano, D., Johnston, D.W., Landeo-Yauri, S., Lyons, M., Pirotta, V., Schofield, G., and Butcher, P.A., Operational Protocols for the Use of Drones in Marine Animal Research, *Drones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 1–35. doi 10.3390/drones4040064

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

Rukovodstvo pol'zovatelya Agisoft Metashape: Professional Edition, versiya 1.7 (Agisoft Metashape: Professional Edition User Manual, version 1.7), St. Petersburg: OOO Agisoft, 2021.

Instruktsiya o poryadke provedeniya obyazatel'nykh trebovaniy k dal'nevostochnym lososevym na KNS i KNP basseynovykh upravleniy rybookhrany i statsionarakh TINRO (Instructions on the procedure for conducting mandatory observations of the Far Eastern salmonids at the CNS and CNP of the basin departments of fish protection and TINRO station), Vladivostok: TINRO, 1987.

Поступила в редакцию 18.03.2022 г.

После доработки 1.04.2022 г.

Принята к публикации 20.05.2022 г.

*The article was submitted 18.03.2022; approved after reviewing 1.04.2022;
accepted for publication 20.05.2022*