

Д.С. ДУДАКОВА, В.М. АНОХИН, М.О. ДУДАКОВ, А.Л. РОНЖИН
**О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ АЭРОЛИМНОЛОГИИ:
ИЗУЧЕНИЕ ПРЕСНЫХ ВОДОЕМОВ И ПРИБРЕЖНЫХ
ТЕРРИТОРИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗДУШНЫХ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

Дудакова Д.С., Анохин В.М., Дудаков М.О., Ронжин А.Л. О теоретических основах аэролимнологии: изучение пресных водоемов и прибрежных территорий с применением воздушных робототехнических средств.

Аннотация. Интеграция методологического базиса нескольких разных наук при междисциплинарных исследованиях является характерной чертой новых механизмов решения современных прикладных задач. Формируемые теоретические основы аэролимнологии, как нового научного направления, рассматриваются с точки зрения вклада в нее трех ключевых наук: лимнологии, информатики и робототехники. Приведены классификации методов и способов лимнологических исследований, воздушных робототехнических средств, информационных технологий, перспективных для решения задач в области аэролимнологии. Задача научного направления аэролимнологии формулируется как изучение возможностей и ограничений комбинированных способов дистанционного сенсорного измерения, роботизированного пробоотбора и аналитического исследования параметров экосистем пресных водоемов для мониторинга и предсказания динамики их развития. Среди основных направлений аэролимнологических исследований выделены: построение ортофотопланов и фотограмметрических пространственных моделей рельефа дна и отдельных элементов донного ландшафта и прибрежной зоны разного масштаба; геолого-геофизическое картирование подводной части береговой зоны; изучение фитопланктона, в частности «цветения» воды, вызванного цианобактериями; исследование распределения и миграций крупных представителей гидрофауны; изучение температурных полей и процессов перераспределения водных масс. Обсуждаются ограничения, накладываемые на использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при пробоотборе и мониторинге прибрежных водных территорий, прежде всего погодно-климатические, временные, пространственные, технические. Преимущество использования беспилотных летательных аппаратов в аэролимнологии обосновывается увеличением скорости получения данных, возможностью полета к труднодоступным и территориально удаленным объектам, снижением влияния человеческого фактора. Научная новизна представленного исследования состоит в попытке интеграции междисциплинарных знаний при использовании беспилотных летательных аппаратов и обработке полученных данных на основе технологий искусственного интеллекта при изучении лимнологических объектов и процессов. Отмечается важная роль геоинформационных систем и приводятся примеры карт типизации берегов и геоморфологии Ладожского озера, размещенные на сайте Центра коллективного пользования научным оборудованием «Северо-Западный центр мониторинга и прогнозирования развития территорий» СПб ФИЦ РАН. Рассматриваются основные этапы методологии проведения аэролимнологических исследований с применением междисциплинарных подходов на основе лимнологии, информатики и робототехнических средств, функционирующих в разных средах.

Ключевые слова: аэролимнология, озероведение, беспилотные летательные аппараты, пресные водоемы, Ладожское озеро, пробоотбор, мониторинг, информатика, робототехника, ГИС.

1. Введение. Междисциплинарные исследования характеризуются эмерджентным использованием подходов и средств одновременно нескольких наук с целью повышения качества измерительных, аналитических этапов изучения и разработки новых оригинальных методов и моделей [1, 2]. Развиваемые теоретические основы аэролимнологии формируются как минимум на трех ключевых науках: лимнологии, информатике и робототехнике.

Целью исследования, результаты которого приведены в данной статье, являлось введение научно-обоснованного нового понятия «аэролимнология», расширяющего технологические основы изучения пресных водоемов и прибрежных территорий с применением воздушных робототехнических средств. Вербально формальная постановка задачи может быть изложена следующим образом. Пусть имеются лимнологические объекты и процессы, требующие исследований в определенных условиях пространственно-временных ограничений, необходимо сформировать методологию проведения аэролимнологических исследований, определяющую требования к беспилотным летательным аппаратам, осуществляющим аэросъемку и физическое взаимодействие со средой на изучаемой территории, и к аналитическому и информационному обеспечению обработки проб, данных и знаний, используемых при визуализации результатов и прогнозирования развития лимнологических объектов.

С точки зрения дериватологии понятие аэролимнология сформировано путем сложения трех производящих основ: аэро, лимно, логия. Если рассматривать диахроническое словообразование термина, то изначально появилась наука лимнология, изучающая водоемы. Добавление основы аэро направлено на сигнификацию применения воздушных измерительных средств в изучении лимнологических процессов. При этом не следует трактовать аэролимнологию, как научное направление изучающее воздушную среду.

На рисунке 1 представлена структура используемых методов, технологий и средств для решения междисциплинарных задач аэролимнологии. В разрабатываемом направлении лимнология, сформированная на стыке геологии, физики, химии и биологии, изучает физические, химические и биологические свойства пресных водоёмов с применением дистанционных измерительных средств. Информатика предоставляет технологии искусственного интеллекта, машинного обучения, визуализации данных и представления знаний. Робототехника, включая беспилотные летательные аппараты и методы их управления, применяется для дистанционного измерения

надводных и подводных характеристик водоемов и прибрежных территорий.

Аэролимнология изучает возможности и ограничения комбинированных способов дистанционного сенсорного измерения, роботизированного пробоотбора и аналитического исследования параметров экосистем пресных водоемов для мониторинга и предсказания динамики их развития.

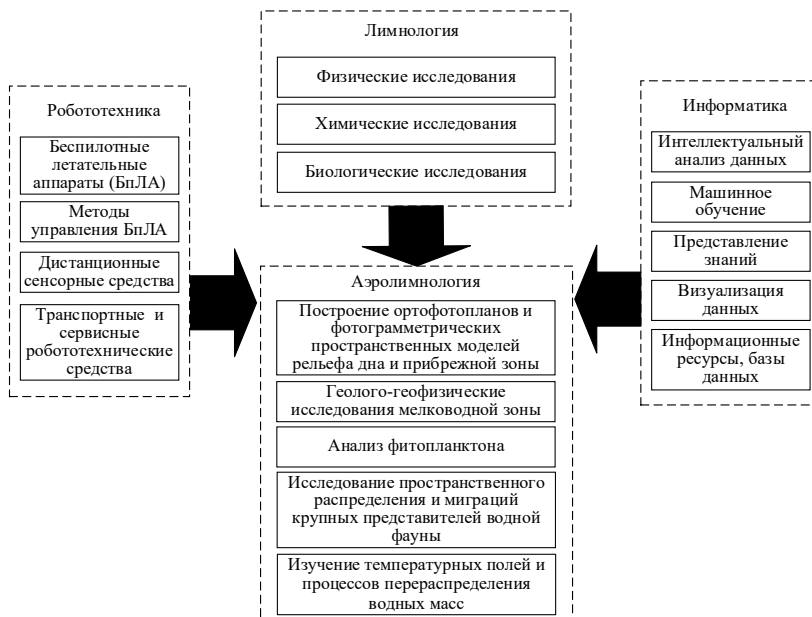


Рис. 1. Междисциплинарные направления исследований аэролимнологии и привлекаемые методы и средства других наук

История развития подходов и дистанционных средств, применяемых в аэрофотогеодезических исследованиях водных объектов-суши, начинается с конца 19 века, когда воздушные шары применялись для аналоговой фотосъемки [3]. При этом значительная нагрузка на техническую и интеллектуальную обработку изображений ложилась на персонал. Снимков было не много, и они изучались тщательным образом с извлечением различных экспертных наблюдений и знаний. Например, наличие брода, а, следовательно, небольшие глубины и скорость течения, пологие склоны берегов, выявлялось по присутствию наезженных дорог с обоих берегов рек [3]. С развитием робототехники и технологий искусственного интеллекта

лимнология получила значительное развитие за счет внедрения дистанционных информационно-измерительных сенсорных систем и методов обработки данных и знаний.

Также следует упомянуть аэрологию, как раздел метеорологии, изучающий процессы, протекающие в атмосфере, и как отрасль горной науки, связанная с анализом движения воздуха, переноса газообразных примесей и тепла в горных шахтах [4]. Аэрология также применяет воздушные средства измерения, в том числе зонды аэростатного, самолетного, ракетного типа, но исключительно для анализа параметров воздушных масс. В задачи же аэролимнологии входит изучение наземных объектов и процессов с помощью воздушных средств.

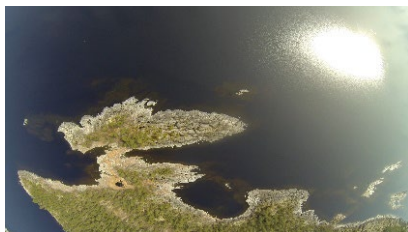
Под перспективными аэролимнологическими средствами анализа и мониторинга понимаются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные оптическими, оптоэлектронными, электромагнитными сенсорными системами, обеспечивающие регистрацию данных, предварительную обработку бортовыми вычислителями и беспроводную передачу полученной информации на стационарно размещенную геоинформационную систему, накапливающую и обрабатывающую потоки данных, информации и знаний с гетерогенных источников.

Особый интерес и новые возможности в связи с привлечением БПЛА появляются для построения ортофотопланов и фотограмметрических пространственных моделей рельефа прибрежной зоны, береговой линии, береговых процессов, прибрежных подводных ландшафтов [5–7]. На рисунках 2 и 3 приведены примеры снимков с высоким разрешением, сделанных видеокамерой с БПЛА, для решения различных задач лимнологии. При этом в большинстве случаев последующее оценивание изучаемого объекта производится только экспертным путем без привлечения технологий искусственного интеллекта и сторонних пространственно-временных данных, что существенно ограничивает проводимые исследования.

Оптико-магнитное навесное оборудование на БПЛА позволяет осуществлять геолого-геофизические исследования акваторий в удаленных или труднодоступных местах [8, 9].

Следующим важным направлением исследований аэролимнологии является изучение растительных сообществ – формирование карт мелководных зарастаний высшей водной растительностью [10], а также изучение фитопланктона [11–13]. Для последнего проводится исследование характеристик поверхностного

слоя водного зеркала водоемов, среди которых важнейшим параметром является концентрация хлорофилла – индикатора развития водорослей – краеугольного камня первичной продукции водоемов, определяющего общую продуктивность гидроэкосистемы. Чрезмерное развитие некоторых видов водорослей (в первую очередь синезеленых водорослей, или цианобактерий), проявляющееся в виде «цветения», может приводить к негативным последствиям для водоемов.



Изучение подводных элементов рельефа прибрежной зоны и оценка межгодовых изменений уровня воды



Геологические исследования, изучение характера трещиноватости пород



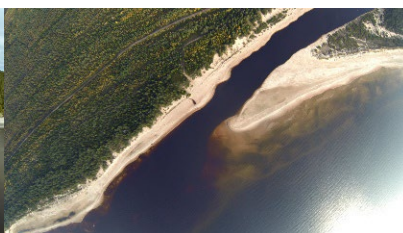
Мониторинг изменений антропогенно измененного залива



Изучение влияния притоков



Изучение береговой зоны и береговых процессов



Изучение береговых процессов и влияния притоков

Рис. 2. Примеры аэрофотоснимков для решения задач аэролимнологии (геолого-геофизический анализ прибрежной зоны; изучение процессов перераспределения водных масс)



Изучение типов берегов шхерного района и оценка развития водных макрофитов



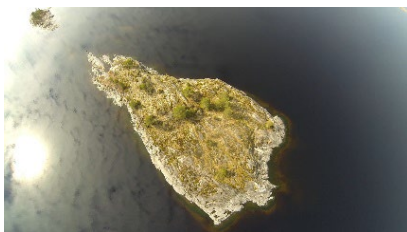
Изучение зарастаемости шхерной литорали макрофитами



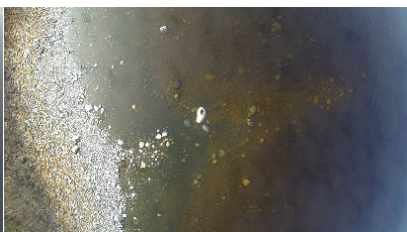
Изучение ветландов (оценка зарастаемости берегов)



Изучение ветландов (оценка зарастаемости берегов)



Учет численности ладожской нерпы



Анализ поведения ладожской нерпы

Рис. 3. Примеры аэрофотоснимков для решения задач аэролимнологии (анализ водной растительности и гидрофауны)

Открывается возможность оперативной идентификации, картирования распределения крупных представителей гидрофауны (водных млекопитающих, крупных рыб) и изучения их сезонных, долговременных миграций и динамики изменения популяций [10, 14, 15].

Еще одним направлением является изучение твердых наносов в толще воды [12, 16]. Изучение температурных полей водных масс является важным этапом при проведении гидрологических исследований и понимании процессов перераспределения водных масс, связанных с потоками вещества и энергии [17].

Накопленная многолетняя картографическая информация позволяет гидрологам изучить факторы, влияющие на характер речного стока, средние уклоны поверхностей водосборов, исследовать русловые процессы, определить плановые деформации речных русел, измерить высоты бровок речных долин и обрывов, глубины рек и водоемов на мелководных участках.

Описанные выше аспекты изучения водоемов являются актуальными для комплексного исследования пресных водоемов, в том числе Ладожского озера, и определяют необходимость создания аэролимнологических информационно-измерительных средств на базе БПЛА. При этом существует несколько подходов к их разработке. Например, создание многоцелевых комплексных устройств, но как правило дорогостоящих, или же проектирование узкоспециализированных меньшей стоимости оборудования и модульных принципов монтажа данных устройств на самих БПЛА [18].

Наличие полноценно укомплектованных технических средств аэролимнологической информационно-измерительной системы позволит решать спектр задач, которые возникают в ходе проведения различных лимнологических исследований. Далее рассмотрим вклад каждой из указанных на рисунке 1 ключевых наук (робототехника, лимнология, информатика) в аэролимнологию.

2. Перспективные воздушные робототехнические средства в решении задач аэролимнологии. На рисунке 4 приведены существующие виды воздушных робототехнических средств и перспективные способы их применения в аэролимнологии. В настоящее время применяются и развиваются различные конструкции БПЛА: аэростаты, мультикоптеры, самолеты с прямым крылом, самолёты вертикального взлёта и посадки, конвертопланы, отличающиеся скоростью и дальностью полета, возможностью зависания над объектом интереса или отбора пробы в заданной точке на определенной глубине [19–22].

Поэтому выбор БПЛА во многом зависит от цели аэролимнологического исследования, удаленности и протяженности изучаемого объекта или процесса. В зависимости от размеров исследуемого пространства, частоты дискретизации создаваемой карты измерений, допустимого времени полета и всей экспедиции могут применяться один или несколько БПЛА, соответственно для их управления привлекаются методы управления одиночным, групповым, роевым управлением БПЛА [23–25].

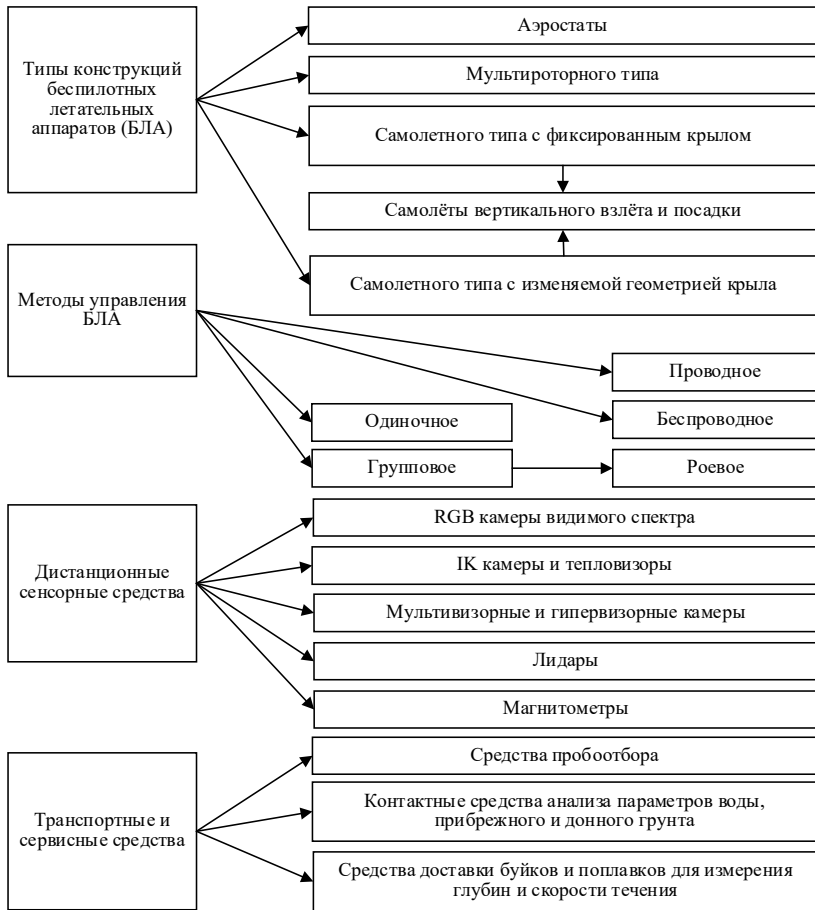


Рис. 4. Применение воздушных робототехнических средств в аэролимнологии

Для изучения отдельного объекта в ограниченной зоне как правило достаточно применения одного БПЛА. В случае анализа территориально распределенного объекта для ускорения процесса, например, при создании ортофотоплана большого участка, или для повышения точности одновременного подсчёта особей гидрофауны во всем водоёме, например, нерп, применяются несколько БПЛА, согласованно решающих целевую задачу. В этом случае используются методы группового управления: 1) централизованного, при котором каждый БПЛА получает команды с единого пульта управления; 2) децентрализованного, при котором каждый БПЛА действует

самостоятельно, принимая решения на основе своих знаний и сенсорных данных. Последний вариант характерен для роевого управления, требующего значительных вычислительных ресурсов на борту каждого БПЛА, обеспечивающих их интеллектуального и оперативность принятия решений, не теряя времени на передачу данных к центральному командному пункту и обратно.

Управление взлетом, посадкой и обслуживанием БПЛА на прибрежных участках, судне, надводных аппаратах и плавучих платформах значительно отличаются от эксплуатации и функционирования БПЛА при мониторинге земельных участков, удалённых от водоёмов. Нестабильность поверхности, куда должен приземлиться БПЛА, требует создания алгоритмов формирования более точных и оперативных движений, а также механизмов демпфирования и надёжного захвата БПЛА на надводной сервисной взлетно-посадочной платформе. Также следует учитывать повышенную влажность, брызги, риски потери БПЛА при падении в воду, сильный порывистый ветер и другие неблагоприятные возмущающие факторы, требующие от разработчиков и операторов формирования надёжных алгоритмов и сценариев управления БПЛА при составлении и реализации полетных заданий.

Для управления, электропитания, записи регистрируемых данных иногда допускается применение подключаемых по информационно-энергетическому кабелю БПЛА, в частности для стационарных объектов изучения [26]. В большинстве же случаев применяются автономные источники питания и беспроводные средства связи WiFi, LoraWan, GSM и другие [27–30].

Наиболее популярными бесконтактными сенсорными системами являются видеокamеры, регистрирующие изображения или осуществляющие видеозапись в видимом спектре [31]. Видеокamеры, установленные на БЛА, позволяют вести съёмку на заданной высоте при исследовании гидрологических объектов. Оценивание термальных процессов производится посредством ИК камер и тепловизоров. Анализ фитопланктона, химических процессов в водных и прибрежных средах производится по изображениям, полученным мульти- и гипервизорными камерами. Проведение геолого-геофизических работ становится возможным с помощью БПЛА с бортовым магнитометром. Оценивание рельефа дна и прибрежной зоны с высокой точностью производится на основе данных, полученных лидаром.

Кроме рассмотренных выше вариантов бесконтактного дистанционного измерения, также перспективны подходы

использования БПЛА на основе физического взаимодействия с наземной/водной средами. Актуальным будущим направлением является оснащение БПЛА устройствами и системами активного взаимодействия с внешними объектами – манипуляторами и захватами. Сброс, опускание, подъем из водной среды навесного оборудования БПЛА являются сложными задачами управления БПЛА, решающими проблему стабилизации воздушной манипуляционной системы, включающей БПЛА и навесное оборудование, взаимодействующее с наземной средой [32]. При сбросе буйков и поплавков, применяемых при измерении глубин и скорости течения, меняется общая масса воздушной системы, и этот фактор следует учитывать, как в локальных алгоритмах стабилизации полета, так и при планировании полетного задания с учетом снижения массы полезной нагрузки и потребляемой энергии после ее сброса.

Более сложной и энергозатратной задачей является отбор проб воды и донных отложений с БПЛА. Так как БПЛА может работать на определенных минимальных высотах над водной поверхностью, то перспективным видится применение тросовых систем, опускающих пробоотборник с БПЛА в заданное местоположение [33, 34]. В зависимости от применяемых гидрохимических аналитических средств обработка проб может производиться на борту или на наземном стационарном пункте после возвращения БПЛА. Первый вариант более оперативный и не требует перевозки проб, но влияет на стоимость оснащения БПЛА.

БПЛА как и все технические средства требуют обслуживания и пополнения энергоресурсов. Разрабатываемые сервисные наземные робототехнические платформы частично решают эти задачи, в частности замену аккумуляторов БПЛА, что значительно увеличивает продолжительность выполнения целевых задач БПЛА, кроме того снижают влияние человеческого фактора, в том числе снижая длительность нахождения участников экспедиции в районах сильного распространения гноса. Проводимые исследования по заряжающим сервисным робототехническим платформам открывают возможность применения БПЛА для обслуживания систем энергопитания, в том числе подводных и надводных роботов [35].

3. Перспективные лимнологические подходы в решении задач аэролимнологии. Лимнология, или озероведение – наука о континентальных водоемах с замедленным водообменом (озёра, водохранилища, пруды и др.). Предметом изучения лимнологии является весь комплекс внутриводоемных, или лимнических процессов, протекающих в озере в тесной связи с водосбором.

Лимнология исследует строение и развитие котловин и берегов водоёмов, донные отложения, физические и химические свойства воды, особенности водного режима (уровень воды, водный баланс), термику водоёмов, ледовые явления, гидрохимические свойства, животный и растительный мир, влияние на водоёмы деятельности человека, занимается изысканием рационального использования водоемов и их охраны. Научные основы лимнологии заложены в 19 веке работами швейцарского учёного Ф. Фореля.

Озера представляют собой сложные гидрологические и гидроэкологические системы. Поэтому для изучения озер применяется целый комплекс методов исследований из гидрологии, гидрофизики, гидрохимии, гидробиологии, геоморфологии, метеорологии, палеолимнологии и других наук [36].

На рисунке 5 приведена классификация основных способов, методов и средств, применяемых лимнологических исследований. Исходными данными для лимнологических знаний являются материалы наблюдений на озёрных станциях, постах, в обсерваториях, материалы, получаемые во время экспедиционных исследований, при проведении аэрофотосъёмки, подводных исследований, результаты физического и математического моделирования процессов, протекающих в водоёмах.

С точки зрения организации проведения лимнологических исследований можно выделить следующие подходы:

- Стационарные исследования озер и водохранилищ ведутся на озёрных станциях и гидрологических постах.

- Полустанционарные исследования, как правило, сопровождают стационарные исследования, проводятся сезонно по специальной программе в соответствии с поставленными практическими и научными задачами.

- Экспедиционные исследования ведутся в связи с научными задачами научных учреждений. Исследования проводятся эпизодически, или сезонно, решаются конкретные научные задачи.

- Комплексный лимнологический метод изучения озер и водохранилищ включает ряд приемов картирования озер, донных отложений, водной растительности и прочей биоты, картографирование рельефа, измерение форм рельефа, регистрация и анализ рельефообразующих, термических, гидродинамических, геологических, химических, гидробиологических процессов, методики химического и биологического анализа донных отложений и озёрных вод и другие современные методики [37].

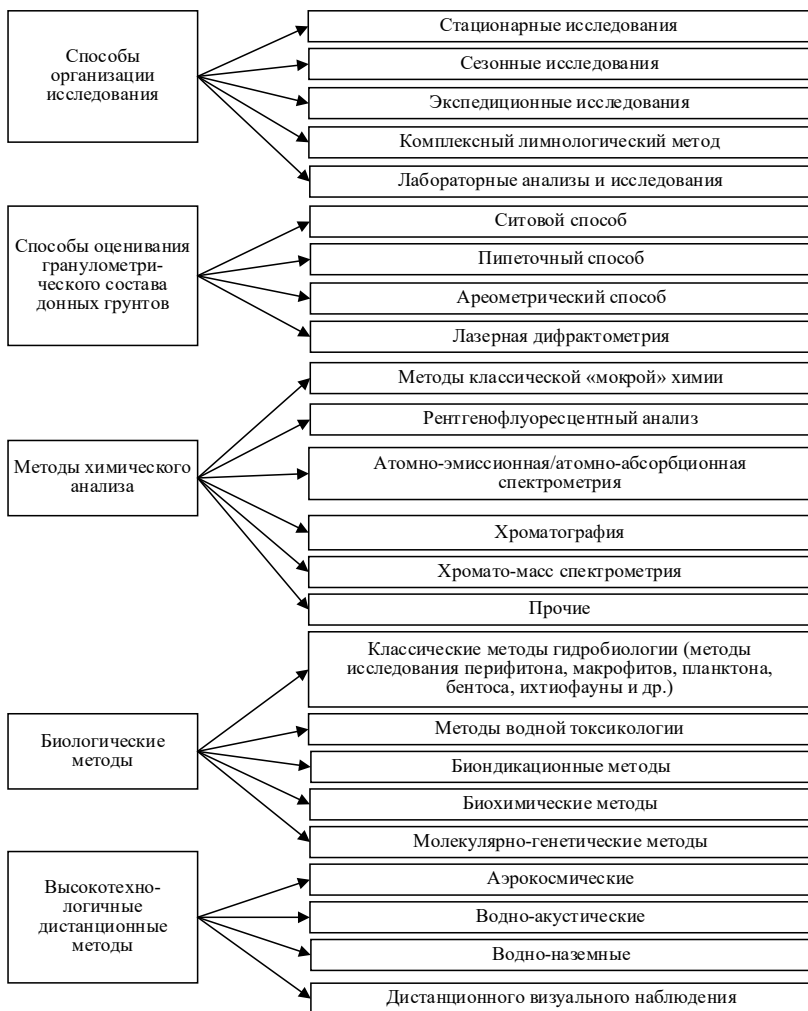


Рис. 5. Основные способы и методы лимнологических исследований

– Лабораторные анализы и исследования направлены на определение физических и химических свойств грунтов и воды, выявление состава водной биоты из проб, полученных в полевых условиях (в частности во время экспедиционных работ). Для выявления природных закономерностей и изучения влияния отдельных факторов проводятся лабораторные эксперименты, где

создаются контролируемые условия. В последние десятилетия происходит бурный рост по созданию нового аналитического оборудования, что позволяет уходить от классических методов. На сегодняшний день широко используется современная приборная база, основанная на новых принципах. Так, при оценке гранулометрического состава донных осадков водных объектов классические методы (ситовой, пипеточный, ареометрический и др.) сменяются использованием метода, основанного на применении многофункциональных анализаторов частиц (лазерная дифрактометрия в воде на основе использования физического принципа рассеяния электромагнитных волн различной длины). К современным методам химического анализа донных осадков относятся: рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) – один из современных спектроскопических методов исследования вещества с целью получения его элементного состава; атомно-эмиссионная/масс-спектрометрия; спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ICP AES or ICP MS); атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) [38]. При анализе биологических проб применяется спектр биологических методов, имеющий свою специфику для каждой конкретной биологической группировки (макрофиты, фитопланктон, зоопланктон, перифитон, мейо- и макробентос и пр.) [39–41]. Гидробиологические методы оценки качества вод имеют длительную историю, в значительной мере совпадающую с историей становления гидробиологии как самостоятельной науки [42]. Для исследований биологических систем, изучения отдельных видов и популяций используются также современные молекулярно-генетические методы [43]. Для изучения физико-географических условий водосборов озер в голоцене в лимнологии используется комплекс микропалеолимнологических методов: спорово-пыльцевой, диатомовый, остракодовый, палеокарпологический и др. Для определения абсолютного возраста отложений используется радиоуглеродный метод [38].

При изучении отдельных процессов широко внедряются в изучение озер и водохранилищ математическое моделирование [44, 45]. В меньшей степени используется натурное или физическое моделирование. При натурном моделировании проводятся эксперименты максимально приближенные к естественным условиям водоема. Например, использование меченого песка в прибрежной зоне с целью изучения динамики течений и транспорта наносов в прибрежной зоне [37].

В последнее время к традиционным направлениям лимнологии начали добавляться приемы, связанные с использованием современных технологий, позволяющих активно использовать дистанционные методы для изучения водных объектов. Дистанционное обследование представляет собой процесс, посредством которого собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. К дистанционным методам относят все виды неконтактных съемок, которые проводятся с различных измерительных платформ: летательных воздушных и космических аппаратов (беспилотных летательных аппаратов, самолетов, вертолетов, космических кораблей, спутников и т.д.), судов и подводных лодок, наземных станций [46]. По местонахождению систем получения информации и используемой технологии дистанционные методы, используемые в лимнологии, относятся к четырем основным группам: аэрокосмические (аэросъемка и спутниковая съемка с использованием большого разнообразия устройств, работающих на различных физических принципах), водно-акустические (предполагает изучение водной среды и дна с использованием различных акустических приборов – эхолотов, гидролокаторов, локаторов бокового обзора, геолокаторов), водно-наземные (использование различных автоматических буйковых станций, автономных дрейфующих станций, автономных измерителей течений и прочих приборов, оснащенных помимо датчиков современными робототехническими модулями) и методы дистанционного визуального наблюдения за водоемом (видеосъемка с обитаемых и необитаемых подводных аппаратов или аквалангистами) [3, 47–55].

4. Перспективные информационные технологии в решении задач аэролимнологии. Современные методы лимнологических исследований позволяют получать пространственные данные и обрабатывать их в геоинформационных системах (ГИС), которые обеспечивающие сбор, хранение, обработку, визуализацию и распространение данных, а также получение на их основе новой информации и знаний о пространственно-координированных объектах, процессах и явлениях [56]. Средства ГИС дают широкие возможности для получения новых знаний и представлений о природе пространственных данных и могут иметь выход на решение широкого спектра практических задач [57, 58]. Перспективным направлением в развитии ГИС является интеграция методов поддержки принятия решений, основанных на технологиях и методах искусственного интеллекта (ИИ) [56].

Важным блоком работы с пространственными данными является визуализация цифровых моделей, создаваемых средствами ГИС. Существует достаточно большая линейка программных продуктов, как открытого доступа, так и коммерческие платформы, предназначенных для построения ГИС. По способу работы с данными и возможностям организации совместной работы с данными в компьютерной сети существуют несколько технологических схем построения ГИС. Наиболее прогрессивная на сегодняшний день основана на использовании в качестве хранилища пространственных данных специализированных расширений для наиболее распространенных SQL серверов, которые на сегодня имеются у всех основных поставщиков подобных решений [58].

Пространственные данные в ГИС представляются в виде интерактивных карт. Картографические изображения на видеозэкране компьютера, возникающие как результат визуализации цифровых данных о пространственно распределенном объекте, обозначаются как электронные карты. Электронные карты, в том числе организованные в виде электронных атласов, находятся в сфере обоюдных интересов картографии и информатики [56, 60–66].

В основу созданного при СПб ФИЦ РАН центра коллективного пользования научным оборудованием «Северо-Западный центр мониторинга и прогнозирования развития территорий» положена информационно-аналитическая платформа интегрированного наземно-космического мониторинга экосистем, обеспечивающая поддержку принятия решений при управлении территориями, в том числе [67–72]: комплексное моделирование и многокритериальное оценивание, анализ и адаптивное прогнозирование рисков аварий и катастроф в природно-технических системах; обеспечение устойчивого и гармоничного использования биологических природных ресурсов в условиях интенсивного хозяйственного развития и климатических изменений; анализ влияния изменений климата на безопасность населения, экосистем, сельское хозяйство; мониторинг и оценивание индивидуальных экономико-демографических и психологических характеристик общества, определяемых методами искусственного интеллекта. На рисунке 6 и 7 показаны примеры карт типизации берегов и геоморфологии Ладожского озера, размещенные на сайте центра коллективного пользования СПб ФИЦ РАН [73].

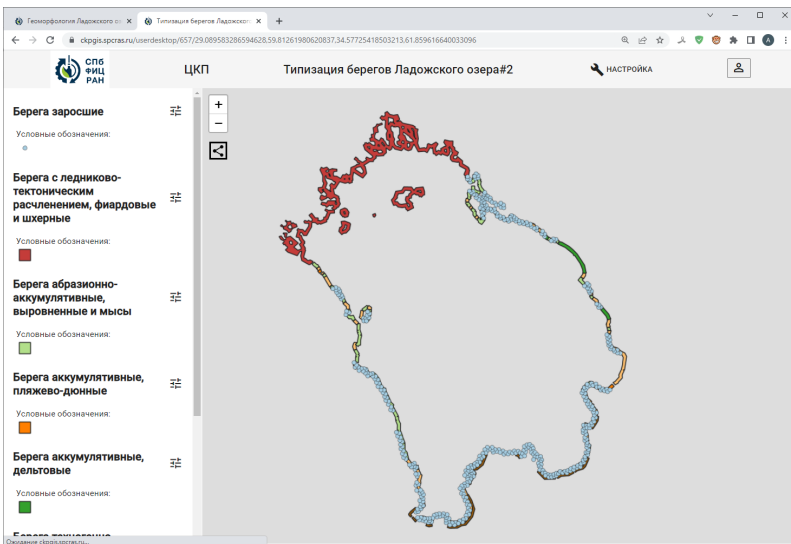


Рис. 6. Карта типизации берегов Ладожского озера на сайте ЦКП СПб ФИЦ РАН

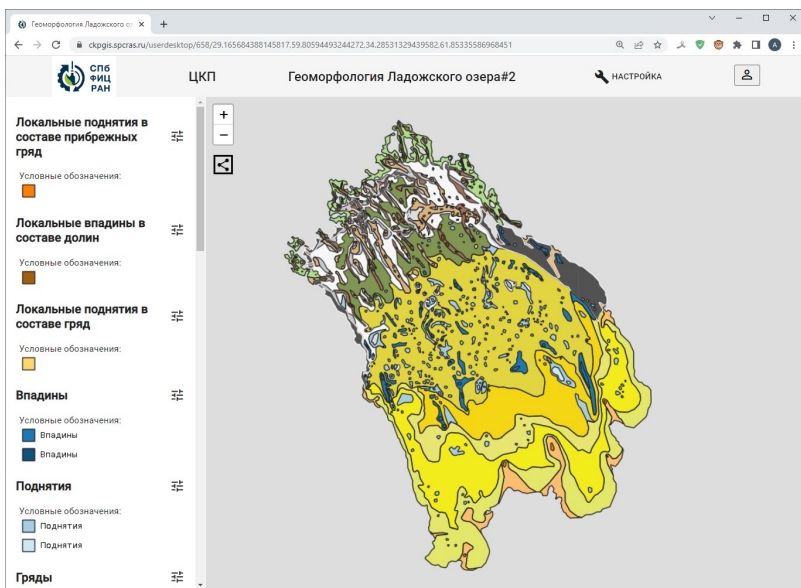


Рис. 7. Карта геоморфологии Ладожского озера на сайте ЦКП СПб ФИЦ РАН

Для решения задач лимнологии с использованием пространственной наиболее перспективными являются цифровые технологии создания ортофотопланов на основе фото- и видеосъемки в видимом спектре с БПЛА. Документально точно и оперативно передаваемый облик местности является базовым материалом для картографической основы в масштабах от 1:500 до 1: 10 000 при формировании и обновлении цифровых карт. Использование классических методов фотограмметрии и программного обеспечения позволяют достигать высокой точности и контроля этапов обработки изображений аэрофотосъемки [74–77]. На рисунке 8 представлена классификация основных подходов к обработке данных, извлечению знаний и источников информационных ресурсов, реализованные в виде специализированных информационных технологий, которые востребованы при решении задач в области аэролимнологии.



Рис. 8. Применение информационных технологий в аэролимнологии

Один из перспективных подходов к поиску информации, совмещающей пространственные и временные характеристики, извлечению знаний и проектированию когнитивных систем поддержки принятия решений основан на применении онтологий [78].

Также сведения об интересующих объектах, их историческому развитию можно получить из информационных ресурсов, в том числе порталов открытых данных (ОД), например, портал ОД России, Санкт-Петербурга, Москвы и т.д. Существует ряд открытых географических баз данных: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) — цифровая модель рельефа (<https://ers.cr.usgs.gov>), GIS-Lab - свободные данные по границам субъектов РФ (<https://gis-lab.info/qa/rusbounds-rosreestr.html>). Архивы метеоданных можно найти в базах NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI) и ВНИИГМИ-МЦД (1880-2009 гг. с точностью до города), «Погода России». ЦКП Института космических исследований РАН.

5. Методология проведения аэролимнологических исследований: возможности и ограничения. Среди ограничений, накладываемых на использование беспилотных летательных аппаратов при пробоотборе и мониторинге прибрежных водных территорий, следует выделить: погодно-климатические, временные, пространственные, технические.

Применение БПЛА на открытой местности осложняется погодными условиями, а в случае близости территориально больших или линейных водных объектов возникают дополнительные возмущающие факторы, как порывистый ветер, облачность, повышенная влажность, осадки, брызги, испарения, мутность воды и другие. При изучении подводных объектов, в частности на мелководье важно учитывать прозрачность воды и влияющие на нее факторы: шторм, дожди, «цветение» воды, вызванное цианобактериями, увеличение мутности, которые могут на длительное время сделать неинформативной аэрофотосъемку. При волнении водной поверхности, появлении взвешенных частиц грунта в воде границы подводных и донных объектов на изображении существенно размываются, появляются заметные искажения.

Съемка водной поверхности в связи с её отражающей способностью не одинаково эффективна в разных погодных и временных условиях. Создаваемые от солнца блики вызывают дополнительные ограничения на период съёмки. Поэтому отдельные виды видеосъемок рекомендуется проводить только в утреннее или вечернее время. Тени от деревьев и облаков на прибрежную водную поверхность существенно зашумляют изображения и снижают их

информативность. В тоже время тени на дне от подводных объектов наоборот повышают вероятность обнаружения представителей гидрофауны.

Также следует учитывать сезонность исследований [3], например, изучение деформаций речных русел путем определения береговой линии по урезу уровня воды с помощью аэрофотосъемки осуществляют в летний меженьный период.

При обсуждении пространственных ограничений следует обратить внимание на протяженность самих водных объектов и их удаленность от транспортной инфраструктуры. Поэтому при расчёте полетных заданий БПЛА необходимо учитывать время полета и возвращения к месту целевой задачи мониторинга или пробоотбора.

Под техническими ограничениями понимаются возможности как БПЛА (масса полезной нагрузки, допустимое время полёта, допустимый диапазон высот, скорость и другие), так и навесного оборудования (разрешающие способности камер, регистрируемый спектральный диапазон, скорость передачи данных, точность позиционирования, возможность группового управления, наличие сервисных наземных платформ и т.д.) [79–81].

Основные этапы методологии проведения аэролимнологических исследований представлены на рисунке 9 с указанием, какие науки привлекаются к их реализации.

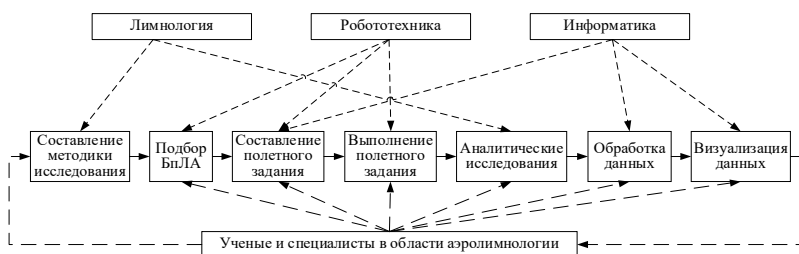


Рис. 9. Методология проведения аэролимнологических исследований

В зависимости цели и вида исследования составляется методика его проведения, где в том числе формулируются требования к оборудованию дистанционного измерения, устанавливаемого на БПЛА. Затем производится выбор типа БПЛА, его летных характеристик, необходимых для установки целевого навесного оборудования и облета требуемой площади исследуемого объекта. С применением методов и средств информатики и робототехники формируется оптимальная траектория полетного задания БПЛА с

учетом геометрических характеристик лимнологического объекта. Для линейного объекта (река, канал, береговая линия озера и т.д.) формируется маршрут вдоль него. При облете и картировании объектов большой площади (озера, водохранилища, болота) траектория формируется так, чтобы все зоны интереса были охвачены, а количество сделанных при аэрофотосъемке снимков обеспечивало генерацию сплошной карты без аномалий на стыке кадров.

Выполнение полетного задания проводится одним или несколькими БПЛА с привлечением наземной, надводной техники, по итогам которого эксперты получают либо массив данных, либо проб для последующих аналитических исследований, подробно представленных на рисунке 5. При обработке и визуализации данных ученые и специалисты с применением технологий машинного обучения и искусственного интеллекта получают новые знания об исследуемом объекте и корректируют методики последующих экспериментов и экспедиций.

6. Заключение. Развитие нового научного направления аэролимнологии представляет несомненный интерес для гидробиологов, геологов и геофизиков, геоморфологов, гидрологов, геохимиков. Одновременный сбор данных при аэросъемке акватории и прибрежных территорий позволяет реализовать комплексный подход к лимнологическим исследованиям и находить новые знания на стыке различных научных дисциплин.

Научная новизна представленного исследования состоит в попытке интеграции междисциплинарных знаний при использовании беспилотных летательных аппаратов и обработке полученных данных на основе технологий искусственного интеллекта при изучении лимнологических объектов и процессов. Методология аэролимнологических исследований и прежде всего составление полётного задания осуществляется совместно специалистами лимнологами, определяющими оптимальные условия аэросъемки и пробоотбора, а робототехники подбирают параметры беспилотных летательных аппаратов, удовлетворяющих требованиям для решения целевой задачи.

В зависимости от выполняемых лимнологических задач применяются различные типы БПЛА с целевым специализированным оборудованием. Наиболее простым вариантом является БПЛА, оснащенный камерой видимого спектра для получения фото- или видеоизображений для последующего составления ортофотопланов в среде ГИС и построения на их основе электронных карт береговой

зоны и выявления различных элементов литоральных биоценозов (например, степени зарастания литорали макрофитами).

Задачи исследования рельефа дна с помощью лидарных систем, выявления интенсивности развития фитопланктонных водорослей и твердых наносов с помощью гиперспектральной съемки, обнаружения крупных водных млекопитающих (например, ладожской нерпы) и изучения водных птиц с использованием тепловизорных систем, изучение термальных полей теми же тепловизорами, а также ИК-камерами, исследование магнитных свойств бортовыми магнитометрами и т.д. требуют оснащения проектируемых БПЛА всеми этими устройствами и делают их более дорогими и сложными.

Перспективным в плане технологических решений является БПЛА, оснащенные устройствами и системами активного физического взаимодействия с внешними объектами – манипуляторами и захватами, что позволит решить задачи по проведению измерений и пробоотбору в сложных условиях или при необходимости точной координатной привязки места проведения съемки и взятию образцов.

Литература

1. Городецкий В.И., Юсупов Р.М. Искусственный интеллект: метафора, наука и информационная технология // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21. № 5. С. 282-293.
2. Солдатенко С.А., Юсупов Р.М., Колман Р. Кибернетический подход к проблеме взаимодействия общества и природы в условиях беспрецедентно меняющегося климата // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19. № 1. С. 5-42.
3. Федоров Ю.А. Аэрофотогодезические исследования водных объектов суши. Учебное пособие. Л., изд. ЛГМИ. 1991. 173 с.
4. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. Учебник для вузов по спец. «Метеорология». Гидрометеоиздат. 1980. 432 с.
5. Белов Н.С., Данченко А.Р. Использование беспилотных летательных аппаратов при географических исследованиях. «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки». 2017. №16. 7 с.
6. Дудакова Д.С., Дудаков М.О. Исследования биогеоценозов шхерного района Ладожского озера (на примере залива Лехмалахти) с применением метода совмещенного использования аэровидеосъемки и подводных исследований // География: развитие науки и образования Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции LXVIII Герценовские чтения, посвященной 70-летию создания ЮНЕСКО. Санкт-Петербург, 2015 Издательство: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (Санкт-Петербург). 2015. С. 179-183.
7. Фотограмметрия и дистанционное зондирование территорий Методическое пособие к лаб. раб. Пермь ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА» 2009. 38 с.
8. Богданов К.В., Бекетова Е.Б. Применение беспилотных летательных аппаратов в геолого-геофизической разведке месторождений полезных ископаемых // Будущее Арктики начинается здесь: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Будущее Арктики начинается здесь». Апатиты, 2019. С. 67-79.

9. Эпов М.И. Злыгостев И.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: 8 Международный научный конгресс. Новосибирск. 10-20 апр. 2012 г. 2012. Т. 2. С. 27-32.
10. Дуленин А.А., Дуленина П.А., Коцок Д.В., Свиридов В.В. Опыт и перспективы использования малых беспилотных летательных аппаратов в морских прибрежных биологических исследованиях // Труды ВНИРО. 2021. Т. 185. С. 134-151.
11. Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов А.И., И.Д. Родионов, Родионова И.П. Исследование возможностей гиперспектральной съемки для мониторинга состояния водных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 125–134.
12. Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Новигатский А.Н. Определение концентрации минеральной взвеси и взвешенного органического вещества по их спектральному поглощению // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 704–711.
13. Суторихин И.А., Букатый В.И., Акулова О.Б. Сезонные изменения спектральной прозрачности и концентрации хлорофилла а в разнотипных озерах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 9. С.801-806.
14. Уличев В.И., Дудакова Д.С. Мониторинг численности ладожской кольчатой нерпы (*Pusa hispida ladogensis*) в шхерном районе Ладожского озера // Всероссийская конференция по крупным внутренним водоёмам (V Ладожский симпозиум) Сб-к науч. трудов конф. Издательство: ООО "Издательство "ЛЕМА" (Санкт-Петербург). 2016. С. 431-436.
15. Уличев В.И., Дудакова Д.С., Дудаков М.О., Труханова И.С. Возможное применение технических средств дистанционного зондирования для изучения ладожской кольчатой нерпы (*Pusa hispida ladogensis*) на линных и релаксационных залежках // морские млекопитающие Голарктики. Сборник научных трудов по материалам IX международной конференции. 2018 Издательство: РОО "Совет по морским млекопитающим" (Москва). 2018. С. 198-203.
16. Коновалов Б.В. Некоторые особенности спектрального поглощения взвеси морской воды // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука. 1979. С. 58–65.
17. Lednev V.N., Grishin M.Ya., Pershin S.M., Bunkin A.F. Quantifying Raman OH-band spectra for remote water temperature measurements // Optics Letters. 2016. vol. 41, Issue 20. pp. 4625-4628.
18. Носов А.М., Савельев А.И., Вильянинов В.Н., Ромашова Ю.Е., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Янин А.П., Самохвалов И.М. Опыт транспортировки компонентов крови с применением беспилотного летательного аппарата // Медицина катастроф. 2022. №3. С.65-69. <https://doi.org/10.33266/2070-1004-2022-3-65-69>.
19. Meshcheryakov R., Salomatin A., Senchuk D., Shirokov A. Scenario of search, detection, and control of invasive plant species using unmanned aircraft systems. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. vol. 245. pp. 259-270.
20. Sevostyanova N., Lebedev I., Lebedeva V., Vatamaniuk I. An Innovative Approach to Automated Photo-Activation of Crop Acreage Using UAVs to Stimulate Crop Growth. Informatics and Automation. 2021. no. 6 (20). pp. 1395-1417.
21. Pshikhopov V., Medvedev M., Soloviev V. The multicopter control algorithms with unstable modes. Proceedings of 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019. vol. 6. pp. 1179-1184.
22. Verba V.S. Methods for aircraft guidance with changes in control priorities. Automation and Remote Control. 2021. vol. 82. № 9. pp. 1519-1529.

23. Milyakov D., Verba V., Merkulov V., Plyashechik A. Two approaches to simulating a group flight of unmanned aerial vehicles as system with lumped and distributed parameters. Proceedings of ITNT 2020 – 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology, 2020. vol. 6. pp. 9253212.
24. Izhboldina V., Lebedev I., Shabanova A. Approach to UAV swarm control and collision-free reconfiguration. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. vol. 187. pp. 81-92.
25. Izhboldina V., Lebedev I. Group movement of UAVs in environment with dynamic obstacles: a survey", International Journal of Intelligent Unmanned Systems, 2022 vol. ahead-of-print. no. ahead-of-print. doi: 10.1108/IJUS-06-2021-0038.
26. Vishnevsky V., Meshcheryakov R. Experience of developing a multifunctional tethered high-altitude unmanned platform of long-term operation. Lecture Notes in Computer Science. 2019. vol. 11659 LNAI. pp. 236-244.
27. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics. Radioengineering. 2021. vol. 30. no. 1. pp. 142-149.
28. Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Плаксиенко В.С., Кабалан А.Э.А. Управление группой БЛА при неопределенных запаздываниях в каналах связи // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2-3 (79). С. 37-56.
29. Krestovnikov K., Korshunov D., Erashov A., Rogozin A. Scalable Architecture of Distributed Control System for Industrial Greenhouse Complexes. In Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. Springer, Cham. LNNS, 2021. vol. 231. pp. 127-132. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_12.
30. Denisov A., Cherskikh E. Algorithm for Placement of Wireless Network Devices for Wide Areas with Variable Soil Moisture // International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. – Springer, Singapore, 2022. vol. 878. pp. 18-25. doi: 10.1007/978-981-19-0390-8_3.
31. Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L. Recent advances in photonic crystal optical devices: a review. Optics & Laser Technology. 2021. vol. 142. p. 107265.
32. Ronzhin A., Vu Q., Nguyen V., Ngo T. Ground and Air Robotic Manipulation Systems in Agriculture. Intelligent Systems Reference Library. Springer, Cham. 2022. vol. 214. 294 p. doi: 10.1007/978-3-030-86826-0. ISBN: 978-3-030-86825-3.
33. Käslin F., Baur T., Meier P., Koller P., Buchmann N., D'Odorico P. Eugster W. Novel Twig Sampling Method by Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Frontiers in Forests and Global Change. 2018. vol. 1. doi: 10.3389/ffgc.2018.00002.
34. Егоркин А.А., Краснобаев Ю.Л., Наумов Д.А. Проведение экологического мониторинга с применением биологических сенсоров и беспилотных летательных аппаратов. В сборнике: Актуальные проблемы биологической и химической экологии. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Д.Б. Петренко. 2019. С 262-266.
35. Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Исследование эффективности беспроводной системы передачи энергии при эксплуатации в воде и растворах // Датчики и системы. 2022. № 2 (261). С. 19-27.
36. Трифонова И.С. Основные этапы развития лимнологии в России до середины XX века // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 9. С. 115-125.
37. Лопух П.С., Якушко О.Ф. Общая лимнология Учебное пособие. Минск: Наука. 2011. 248 с.
38. Шелехова Т.С., Слукровский З.И., Лаврова Н.Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии / Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2020. 111 с.

39. Абакумов В.А. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. Абакумова В.А. СПб.: Гидрометеоздат. 1992. 318 с.
40. Курашов Е.А. Методы и подходы для количественного изучения пресноводного мейобентоса // Актуальные вопросы изучения микро-, мейзообентоса и фауны зарослей пресноводных водоемов. Тематические лекции и материалы I Международной школы-конференции Россия Борок, 2-7 октября 2007 г. – Нижний Новгород: Вектор ТиС. 2007. С. 5-35.
41. Плотников Г.К., Пескова Т.Ю., Шкуте А., Пупиня А., Пупиньш М. Сборник классических методов гидробиологических исследований для использования в аквакультуре. Daugavpils universitātes akadēmiskais apgāds “Saule”, 2017. 282 с.
42. Леонтьев В.В. Краткий курс лекций по гидробиологии. Учебное пособие для студентов-бакалавров биологических направлений Елабуга. 2015. 90 с.
43. Доменюк В.П., Гончаров А.Ю. Проблемы и перспективы использования молекулярно-генетических методов в гидробиологических исследованиях // Экология моря. 2005. № 68. С. 48-52.
44. Кондратьев С.А. Формирование внешней нагрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб.: Наука. 2007. 255 с.
45. Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Петрова Н.А.. / Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. Л.А. Руховец. СПб: Наука, 2003. 361 с.
46. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: учеб. пособие / Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 165 с.
47. Галошин А.И. Современное состояние и тенденции развития гидрографо – геодезического обеспечения морских геологоразведочных работ // Успехи современного естествознания. 2002. № 2. С. 10-21.
48. Долинская Е.М., Бирицкая С.А., Теплых М.А., Ермолаева Я.К., Карнаухов Д.Ю., Зилов Е.А. Дистанционный подход в проведении гидробиологических исследований: от видеосъемки и эхолотирования до применения искусственного интеллекта и методов молекулярной биологии // Байкальский зоологический журнал. 2020. № 2 (28). С. 5-11.
49. Комплексный дистанционный мониторинг озерю Сб.науч.тр. / Отв.ред. Кондратьев К.Я. Л.: Изд-во Наука, 1987. 288 с.
50. Костяной А.Г., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Дистанционное зондирование океанов и морей // Земля и Вселенная. 2011. № 5. С. 33-44.
51. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Каримова С.С., Бочарова Т.Ю. Применение радиолокаторов RADARSAT-2 и TerraSAR-X для исследования гидродинамических процессов в океане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012.Т 9. № 2. С. 312-323.
52. Мишев Д. Дистанционные исследования Земли из космоса. М.: 1985. 229 с.
53. Новые идеи в океанологии / Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова. М.: Наука. Т. 1: Физика. Химия. Биология / Отв. ред. М.Е. Виноградов, С.С. Лаппо, 2004. 351 с.
54. Рыбалко А.Е., Токарев М.Ю., Субетто Д.А., Алешин М.И., Беляев П.Ю., Савельева Л.А., Кузнецов В.Ю. Использование сейсмоакустических методов при изучении крупных озер для решения стратиграфических, палеогеографических и геоэкологических задач // озеро Евразии: проблемы и пути их решения Материалы II Международной конференции. Издательство: Академия наук Республики Татарстан (Казань), 2019. С. 314-318.
55. Черных Д.В. Разработка методов и программных средств акустического зондирования водной толщи и дна океана в зонах разгрузки метана. М., 2014. 167 с.

56. Каправлов Е.Г., Кошкарев А.В, Тикунов В.С. и др. Геоинформатика: Учеб.для студ.вузов / под ред В.С. Тикунова М.: Издатцентр «Академия», 2005. 480 с.
57. Зеленцов В.А., Потрысаев С.А., Пиманов И.Ю. Выбор архитектуры систем интеграции разнородных информационных ресурсов при комплексном моделировании природно-технических объектов // Информатизация и связь. 2021. № 7. С. 72-77.
58. Zelentsov V.A., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Pimanov I.Y., Ponomarenko M.R., Potryasaev S.A., Semenov A.E., Sobolevskii V.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. A model-oriented system for operational forecasting of river floods. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. vol. 89. № 4. pp. 405-417.
59. Мыльников Д.Ю. Геоинформационные платформы. 3-я ред. // Политерм [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.politerm.com/articles/obzor_gis.pdf
60. Zakharov K., Saveliev A. Algorithm for Edge Detection of Floodable Areas, Based on Heightmap Data // 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR)-2021). 2021. vol. 232. pp. 211-222. doi: 10.1007/978-981-16-2814-6_19
61. Krylenko I., Alabyan A., Alekseyuk A., Sazonov A., Zavyalova E., Belikov V., Pimanov I., Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling ice-jam floods in the frameworks of an intelligent system for river monitoring. Water Resources. 2020. vol. 47. № 3. pp. 387-398.
62. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Pimanov I.Y., Ponomarenko M.R. Integrated use of GIS, remote sensing data and a set of models for operational flood forecasting. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 2019. pp. 477-483.
63. Mochalov V.F., Grigorieva O.V., Markov A.V., Ivanets M.O., Zelentsov V.A. Intelligent technologies and methods of tundra vegetation properties detection using satellite multispectral imagery. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. vol. 986. pp. 234-243.
64. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Semenov A.E. Information system for analyzing negative impacts on forests of the border regions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. vol. 806, p. 012001. doi:10.1088/1755-1315/806/1/012001.
65. Sobolevskii V.A. The system of convolution neural networks automated training // CEUR Workshop Proceedings. 2021. vol. 2803. p. 100-106. doi 10.24412/1613-0073-2803-100-106.
66. Mikhailov V., Ponomarenko M., Sobolevsky V. Simulation of phytomass dynamics of plant communities based on artificial neural networks and NDVI // Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (2nd Edition). Proceedings of 2nd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-2), Tunisia, 2019. Springer, 2021. p. 1335-1339. doi: 10.1007/978-3-030-51210-1_211.
67. Ронжин А.Л., Зеленцов В.А., Богомолов А.В., Кулешов С.В. Технологии визуализации, обработки пространственных данных, мониторинга и проактивного управления развитием экосистем Северо-Западного региона. В сборнике: Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. Материалы VI Международной научно-практической конференции. Редакция: П.В. Намм (отв. редактор) [и др.]. Хабаровск. 2021. С. 207-213.
68. Sokolov B.V., Zakharov V.V., Krylov A.V., Salukhov V.I. Models and algorithms for planning and scheduling of complex objects functioning and modernization. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. vol. 330 LNNS. pp. 610-618.

69. Sokolov B.V., Yusupov R.M. Scientific basis of management and cybernetics methodologies integration. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. vol. 442 LNNS. pp. 52-59.
70. Ogij O.G., Osipov V.Y., Tristanov A.B., Zhukova N.A. Tasks and performance indicators of intelligent neural network support for decisions on managing labor potential of the fishery complex. *Marine intelligent technologies*. 2021. № 4-4 (54). pp. 73-79.
71. Nagoev Z.V., Nagoeva O.V., Pshenokova I.A., Bzhikhatlov K.C., Gurtueva I.A., Kankulov S.A. Multiagent neurocognitive models of the processes of understanding the natural language description of the mission of autonomous robots. *Studies in Computational Intelligence*. 2022. vol. 1032 SCI. pp. 327-332.
72. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures. *Cognitive Systems Research*. 2021. vol. 66. pp. 82-88.
73. Dudakova D., Anokhin V., Dudakov M., Judin S. Mapping Rocky Coastal Landscapes in Northern Lake Ladoga around the islands of Raipatsaari and Lussikainluoto // *GEOHAB 2019 Marine geological and biological habitat mapping*. Saint-Petersburg. Russia. May 13-17. 2019. p.51-52.
74. Ламков И.М., Чермошеницев А.Ю., Арбузов С.А., Гук А.П. Исследование возможностей применения квадрокоптера для съёмки береговой линии обводненного карьера с целью государственного кадастрового учета // *Вестник СГУГиТ*. 2015. Т. 1 (29). С. 200-209.
75. Овчинникова Н.Г., Ниценко И.А. Использование беспилотных летательных аппаратов в мониторинге водных объектов. Экономика и экология территориальных образований. 2022. Т.6. № 1. С. 87–94.
76. Отчет о работе по теме «Оценка возможности создания опытного района применения беспилотных авиационных систем для выполнения сервисно-транспортных задач» Шифр «Тайга 1». Томск: 2018. 138 с.
77. Рубен М.А.Э. Разработка и исследование фотограмметрических технологий мониторинга береговой линии по материалам аэрофотосъемки. М.: 2016. 97 с.
78. Volkov, A., Teslya, N., Moskvitin, G., Brovin, N., Bochkarev, E. Spatio-temporal Data Sources Integration with Ontology for Road Accidents Analysis. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2022. vol. 444 LNBIP. pp. 251–262. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04216-4_23.
79. Erashov A., Krestovnikov K. Algorithm for controlling manipulator with combined array of pressure and proximity sensors in gripper // *Electromechanics and Robotics*. 2021. vol. 232. pp. 61-71. doi: 10.1007/978-981-16-2814-6_6.
80. Krestovnikov K., Cherskikh E., Bykov A. Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission // *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2020. vol. 26. no. 6. doi: 10.5755/j01.eie.26.6.26181.
81. Kozyr P., Erashov A., Saveliev A. Algorithm for Determining Target Point of Manipulator for Grasping an Object Using Combined Sensing Means. *Lecture Notes in Networks and Systems / Data Science and Intelligent Systems*. 2021. vol. 231. pp. 337-350. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_27.

Дудакова Дина Сергеевна — канд. биол. наук, научный сотрудник, лаборатория гидробиологии, ИНОЗ РАН - СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: гидробиология, мейобентология, перифитология, изучение биологических инвазий, подводное ландшафтоведение, подводная геология и геоморфология, биогеохимия. Число научных публикаций — 98. judina-d@yandex.ru; улица Севастьянова, 9, 196105, Санкт-Петербург, Россия; п.т.: +7(812)387-0260.

Анохин Владимир Михайлович — д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория географии и гидрологии, ИНОЗ РАН - СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: геоморфология, геоморфологические особенности строения дна и берегов Ладожского озера. Число научных публикаций — 136. vladanokhin@yandex.ru; улица Севастьянова, 9, 196105, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)387-0260.

Дудаков Михаил Олегович — инженер, лаборатория комплексных проблем лимнологии, ИНОЗ РАН - СПб ФИЦ РАН. Область научных интересов: техническое обеспечение и автоматизация измерительных средств лимнологических исследований. Число научных публикаций — 34. mike814@yandex.ru; улица Севастьянова, 9, 196105, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)387-0260.

Ронжин Андрей Леонидович — д-р техн. наук, профессор, профессор РАН, директор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: технологии человеко-машинного взаимодействия, искусственного интеллекта, робототехника. Число научных публикаций — 400. ronzhin@ias.spb.su; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)328-3311.

D. DUDAKOVA, V. ANOKHIN, M. DUDAKOV, A. RONZHIN
**ON THEORETICAL FOUNDATIONS OF AEROLIMNOLOGY:
STUDY OF FRESH WATER BODIES AND COASTAL
TERRITORIES USING AIR ROBOT EQUIPMENT**

Dudakova D., Anokhin V., Dudakov M., Ronzhin A. On Theoretical Foundations of Aerolimnology: Study of Fresh Water Bodies and Coastal Territories Using Air Robot Equipment.

Abstract. The integration of the methodological basis of several different sciences in interdisciplinary research is a characteristic feature of new mechanisms for solving modern applied problems. The emerging theoretical foundations of aerolimnology, as a new scientific direction, are considered from the point of view of the contribution of three key sciences to it: limnology, informatics and robotics. Classifications of methods and approaches of limnological research, airborne robotic means, and information technologies that are promising for solving problems in the field of aerolimnology are given. The task of the scientific direction of aerolimnology is formulated as the study of the possibilities and limitations of combined methods of remote sensory measurement, robotic sampling and analytical study of the parameters of freshwater ecosystems to monitor and predict the dynamics of their development. Among the main areas of aerolimnological research, the following are distinguished: the construction of orthophotomaps and photogrammetric spatial models of the bottom topography and individual elements of the bottom landscape and coastal zone of various scales; geological and geophysical mapping of the underwater part of the coastal zone; the study of phytoplankton, in particular, the "bloom" of water caused by cyanobacteria; study of distribution and migration of large representatives of hydrofauna; study of temperature fields and processes of redistribution of water masses. The limitations imposed on the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in sampling and monitoring coastal water areas are discussed, primarily weather-climatic, temporal, spatial, and technical. The advantage of using unmanned aerial vehicles in aerolimnology is justified by an increase in the speed of data acquisition, the possibility of approaching hard-to-reach and territorially remote objects, and a decrease in the influence of the human factor. The scientific novelty of the presented research consists in an attempt to integrate interdisciplinary knowledge when using unmanned aerial vehicles and processing the obtained data based on artificial intelligence technologies in the study of limnological objects and processes. The important role of geoinformation systems is noted and examples of maps of shore typification and geomorphology of Lake Ladoga are given, posted on the website of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment "North-Western Center for Monitoring and Forecasting the Development of Territories" of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. The main stages of the methodology for conducting aerolimnological studies using interdisciplinary approaches based on limnology, informatics and robotic tools operating in different environments are considered.

Keywords: aerolimnology, lake science, unmanned aerial vehicles, fresh water bodies, Lake Ladoga, sampling, monitoring, informatics, robotics, GIS.

References

1. Gorodetsky V.I., Yusupov R.M. [Artificial Intelligence: Metaphor, Science and Information Technology]. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. 2020. 21(5). pp. 282-294. doi: 10.17587/mau.21.282-293. (In Russ.).

2. Soldatenko S., Yusupov R., Colman R. [Cybernetic Approach to Problem of Interaction between Nature and Human Society in Context of Unprecedented Climate Change]. Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings. 2020. № 1 (19). pp. 5-42. (In Russ.).
3. Fedorov Ju.A. Ajerofotogeodezicheskie issledovanija vodnyh obyektov sushi. [Aerial photogeodetic studies of land water bodies]. Uchebnoe posobie. L., izd. LGMI, 1991. 173 p. (In Russ.).
4. Pavlov N.F. Ajerologija, radiometeorologija i tehnika bezopasnosti. [Aerology, radiometeorology and safety engineering]. Uchebnik dlja vuzov po spec. «Meteorologija». Gidrometeoizdat, 1980. 432 p. (In Russ.).
5. Belov N.S., Danchenkov A.R. [The use of unmanned aerial vehicles in geographical research]. Nauchno-prakticheskij jelektronnyj zhurnal Alleja Nauki – Scientific and practical electronic journal Alley of Science. 2017. №16. 7 p. (In Russ.).
6. Dudakova D.S., Dudakov M.O. [Research of biogeocenoses of the skerry region of Lake Ladoga (on the example of the Lekhmalakhti Bay) using the method of combined use of aerial video and underwater research]. Geografija: razvitie nauki i obrazovanija Kollektivnaja monografija po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-praktichesknoj konferencii LXVIII Gercenovskie chtenija, posvjashhennoj 70-letiju sozdanija JuNESKO – Geography: the development of science and education: Collective monograph based on the materials of the International Scientific and Practical Conference LXVIII Herzen Readings, dedicated to the 70th anniversary of the creation of UNESCO. Sankt-Petersburg: Rossijskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet im. A.I. Gercena, 2015, pp. 179-183. (In Russ.).
7. Fotogrammetrija i distancionnoe zondirovanie territorij [Photogrammetry and remote sensing of territories]. Metodicheskoe posobie k lab. rab. Perm: FGOU VPO «Permskaja GSHA», 2009. 38 p. (In Russ.).
8. Bogdanov K.V., Beketova E.B. [The use of unmanned aerial vehicles in geological and geophysical exploration of mineral deposits]. Budushhee Arktiki nachinaetsja zdes': Sbornik materialov vsrossijskoj nauchno-praktichesknoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Budushhee Arktiki nachinaetsja zdes». Apatity, 2019. pp. 67-79. (In Russ.).
9. Jepov M.I. Zlygostev I.N. [The use of unmanned aerial vehicles in airborne geophysical reconnaissance]. Interjekspo GEO-Sibir-2012: 8 Mezhdunarodnyj nauchnyj congress – Interexpo GEO-Siberia-2012: 8th International Scientific Congress. Novosibirsk, 2012. vol. 2. pp. 27-32. (In Russ.).
10. Dulenin A.A., Dulenina P.A., Kocjuk D.V., Sviridov V.V. [Experience and prospects for the use of small unmanned aerial vehicles in marine coastal biological research]. Trudy VNIRO – Proceedings of VNIRO. 2021. vol. 185. pp. 134-151. (In Russ.).
11. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I., Rodionov I.D., Rodionova I.P. [Investigation of hyperspectral survey capabilities for monitoring water bodies state and water quality]. Sovremennye problemy distantsionnoe zondirovaniya Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017. vol. 14. no. 2. pp. 125-134. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-125-134. (In Russ.).
12. Konovalov B.V., Kravchishina M.D., Beljaev N.A., Novigatskij A.N. [Determination of the concentration of mineral suspension and suspended organic matter by their spectral absorption]. Okeanologija – Oceanology. 2014. vol. 54. № 5. pp. 704–711. (In Russ.).
13. Sutorikhin I.A., Bukatyj V.I., Akulova O.B. [Seasonal changes of water spectral transparency and concentration of chlorophyll a in different-type lakes]. Optika Atmosfery i Okeana – Atmospheric and ocean optics. 2014. vol. 27. no. 09. pp. 801-806. (In Russ.).

14. Ulichev V.I., Dudakova D.S. [Monitoring the abundance of the Ladoga ringed seal (*Pusa hispida ladogensis*) in the skerry region of Lake Ladoga]. Vserossijskaja konferencija po крупным vnutrennim vodojomam (V Ladozhskij simpozium) Sb-k nauch. trudov konf. [V Ladoga Symposium: Collection of scientific papers of the conference]. Sankt-Peterburg: OOO "Izdatelstvo "LEMA", 2016. pp. 431-436. (In Russ.).
15. Ulichev V.I., Dudakova D.S., Dudakov M.O., Truhanova I.S. [Possible application of technical means of remote sensing for studying the Ladoga ringed seal (*Pusa hispida ladogensis*) on moulting and relaxation haulouts]. Morskije mlekopitajushhie Golarctiki. Sbornik nauchnyh trudov po materialam IX mezhdunarodnoj konferencii [Marine mammals of the Holarctic. Collection of scientific papers]. Moskva: ROO "Sovet po morskim mlekopitajushhim", 2018. pp. 198-203. (In Russ.).
16. Konovalov B.V. Nekotorye osobennosti spektral'nogo pogloshhenija vzvesi morskoj vody [Some Features of the Spectral Absorption of Sea Water Suspension] Opticheskie metody izucheniya okeanov i vnutrennih vodoemov. Novosibirsk: Nauka, 1979. pp. 58–65. (In Russ.).
17. Lednev V.N., Grishin M.Ya., Pershin S.M., Bunkin A.F. Quantifying Raman OH-band spectra for remote water temperature measurements. Optics Letters. 2016. vol. 41. Issue 20. pp. 4625-4628.
18. Nosov A.M., Savelev A.I., Viljaninov V.N., Romashova Ju.E., Lebedev I.V., Lebedeva V.V., Janin A.P., Samohvalov I.M. [Experience in transporting blood components using an unmanned aerial vehicle]. Medicina katastrof – Emergency Medicine. 2022. № 3. pp. 65-69. doi: 10.33266/2070-1004-2022-3-65-69. (In Russ.).
19. Meshcheryakov R., Salomatin A., Senchuk D., Shirokov A. Scenario of search, detection, and control of invasive plant species using unmanned aircraft systems. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. vol. 245. pp. 259-270.
20. Sevostyanova N., Lebedev I., Lebedeva V., Vatamaniuk I. An Innovative Approach to Automated Photo-Activation of Crop Acreage Using UAVs to Stimulate Crop Growth. Informatics and Automation. 2021. № 6 (20). pp. 1395-1417.
21. Pshikhopov V., Medvedev M., Soloviev V. The multicopter control algorithms with unstable modes. Proceedings of 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019. vol. 6. pp. 1179-1184.
22. Verba V.S. Methods for aircraft guidance with changes in control priorities. Automation and Remote Control. 2021. vol. 82. № 9. pp. 1519-1529.
23. Milyakov D., Verba V., Merkulov V., Plyashechik A. Two approaches to simulating a group flight of unmanned aerial vehicles as system with lumped and distributed parameters. Proceedings of ITNT 2020 – 6th IEEE International Conference on Information Technology and Nanotechnology, 2020. vol. 6. pp. 9253212.
24. Izhboldina V., Lebedev I., Shabanova A. Approach to UAV swarm control and collision-free reconfiguration. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2021. vol. 187. pp. 81-92.
25. Izhboldina V., Lebedev I. Group movement of UAVs in environment with dynamic obstacles: a survey", International Journal of Intelligent Unmanned Systems. 2022. vol. ahead-of-print. no. ahead-of-print. doi: 10.1108/IJIUS-06-2021-0038.
26. Vishnevsky V., Meshcheryakov R. Experience of developing a multifunctional tethered high-altitude unmanned platform of long-term operation. Lecture Notes in Computer Science. 2019. vol. 11659 LNAI. pp. 236-244.
27. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics. Radioengineering. 2021. vol. 30. № 1. pp. 142-149.
28. Gajduk A.R., Kapustjan S.G., Plaksienko V.S., Kabalan A.Je.A. [Control of a group of UAVs with indefinite delays in communication channels]. Nauchnyj vestnik

- Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta – Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. 2020. № 2-3 (79). pp. 37-56. (In Russ.).
29. Krestovnikov, K., Korschunov, D., Erashov, A., Rogozin, A. Scalable Architecture of Distributed Control System for Industrial Greenhouse Complexes. In Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software. Springer, Cham. LNNS, 2021. vol. 231. pp. 127-132. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_12.
30. Denisov A., Cherskikh E. Algorithm for Placement of Wireless Network Devices for Wide Areas with Variable Soil Moisture. International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems. Springer, Singapore, 2022. vol. 878. pp. 18-25. doi: 10.1007/978-981-19-0390-8_3.
31. Butt M.A., Khonina S.N., Kazanskiy N.L. Recent advances in photonic crystal optical devices: a review. Optics & Laser Technology. 2021. vol. 142. p. 107265.
32. Ronzhin A., Vu Q., Nguyen V., Ngo T. Ground and Air Robotic Manipulation Systems in Agriculture. Intelligent Systems Reference Library. Springer, Cham. 2022. vol. 214. 294 p. doi: 10.1007/978-3-030-86826-0. ISBN: 978-3-030-86825-3.
33. Käslin F., Baur T., Meier P., Koller P., Buchmann N., D'Odorico P., Eugster W. Novel Twig Sampling Method by Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Frontiers in Forests and Global Change. 2018. vol. 1. doi: 10.3389/ffgc.2018.00002.
34. Egorkin A.A., Krasnobaev Ju.L., Naumov D.A. [Carrying out environmental monitoring using biological sensors and unmanned aerial vehicles]. (Russ. ed.: Petrenko D.B.) V sbornike: Aktualnye problemy biologicheskoy i himičeskoj jekologii. Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii [Actual problems of biological and chemical ecology: Collection of materials]. 2019. pp. 262-266. (In Russ.).
35. Krestovnikov K.D., Erashov A.A. [Investigation of the efficiency of a wireless power transmission system when operating in water and solutions]. Datchiki i sistemy – Sensors and systems. 2022. № 2 (261). pp. 19-27. (In Russ.).
36. Trifonova I.S. [The main stages in the development of limnology in Russia until the middle of the 20th century]. Trudy Karelskogo nauchnogo centra RAN – Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. № 9. pp. 115-125. (In Russ.).
37. Lopuh P.S., Jakushko O.F. Obshhaja limnologija [General limnology]. Minsk: Nauka, 2011. 248 p. (In Russ.).
38. Shelehova T.S., Slukovskij Z.I., Lavrova N.B. Metody issledovanija donnyh otlozhenij ozer Karelii [Methods for studying bottom sediments of lakes in Karelia]. Petrozavodsk: Karelskij nauchnyj centr RAN, 2020. 111 p. (In Russ.).
39. Abakumov V.A. Rukovodstvo po gidrobiologičeskomu monitoringu presnovodnyh jekosistem [Guidelines for Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystems]. (Russ. ed.: Abakumova V.A.) SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 318 p. (In Russ.).
40. Kurashov E.A. [Methods and approaches for quantitative study of freshwater meiobenthos]. Aktualnye voprosy izuchenija mikro-, mejozoobentosa i fauny zaroslej presnovodnyh vodoemov. Tematičeskie lekčii i materialy I Mezhdunarodnoj shkoly-konferencii Rossija Borok [Topical issues in the study of micro-, meiozoobenthos and fauna of thickets of freshwater reservoirs: Thematic lectures and materials]. Nizhnij Novgorod: Vektor TiS, 2007. pp. 5-35. (In Russ.).
41. Plotnikov G.K., Peskova T.Ju., Shkute A., Pupinja A., Pupinsh M. Sbornik klassičeskikh metodov gidrobiologičeskikh issledovanij dlja ispolzovanija v akvakulture [Compendium of classical methods of hydrobiological research for use in aquaculture]. Latvija: Daugavpils universitātes akadēmiskais apgads "Saule", 2017. 282 p. (In Russ.).
42. Leontev V.V. Kratkij kurs lekčij po gidrobiologii. Učebnoe posobie dlja studentov-bakalavrov biologičeskikh napravlenij Elabuga [A short course of lectures on

- hydrobiology. Textbook for bachelor students in biology [Elabuga]. 2015. 90 p. (In Russ.).
43. Domenjuk V.P., Goncharov A.Ju. [Problems and Prospects of Using Molecular Genetic Methods in Hydrobiological Research]. *Jekologija morja – Sea ecology*. 2005. vol. 68. pp. 48-52. (In Russ.).
 44. Kondratev S.A. Formirovanie vneshnej nagruzki na vodoemy: problemy modelirovanija [Formation of external load on water bodies: modeling problems]. SPb.: Nauka, 2007. 255 p. (In Russ.).
 45. Astrahancev G.P., Menshutkin V.V., Petrova N.A. Modelirovanie jekosistem bolshih stratificirovannyh ozer [Ecosystem modeling for large stratified lakes]. (Russ. ed.: Ruhovec L.A.). SPb: Nauka, 2003. 361 p. (In Russ.).
 46. Sutyryna E.N. Distancionnoe zondirovanie Zemli: ucheb. posobie [Earth Remote Sensing: Tutorial]. Irkutsk : Izd-vo IGU, 2013. 165 p. (In Russ.).
 47. Galoshin A.I. [Current state and development trends of hydrographic and geodetic support for offshore geological exploration]. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniija – Successes of modern natural science*. 2002. № 2. pp. 10-21. (In Russ.).
 48. Dolinskaja E.M., Birickaja S.A., Teplyh M.A., Ermolaeva Ja.K., Karnauhov D.Ju., Zilov E.A. [Remote approach in conducting hydrobiological research: from video filming and echo sounding to the use of artificial intelligence and molecular biology methods]. *Bajkalskij zoologicheskij zhurnal – Baikalsk Zoological Journal*. 2020. no. 2 (28). pp. 5-11. (In Russ.).
 49. Kompleksnyj distancionnyj monitoring ozer. Sb.nauch.tr. [Complex remote monitoring of lakes. Collection of scientific papers]. (Russ. ed.: Kondratev K.Ja.) L.: Izd-vo Nauka, 1987. 288 p. (In Russ.).
 50. Kostjanov A.G., Lavrova O.Ju., Mitjagina M.I. Distancionnoe zondirovanie okeanov i morej. Zemlja i Vselennaja. 2011. no 5. pp. 33-44. (In Russ.).
 51. Lavrova O.Ju., Mitjagina M.I., Karimova S.S., Bocharova T.Ju. [Application of RADARSAT-2 and TerraSAR-X radars to study hydrodynamic processes in the ocean]. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa – Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2012. vol. 9. №2. pp. 312-323. (In Russ.).
 52. Mishev D. Distancionnye issledovanija Zemli iz kosmosa [Remote sensing of the Earth from space]. M.: 1985. 229 p. (In Russ.).
 53. Novye idei v okeanologii. In-t okeanologii im. P.P. Shirshova [New ideas in oceanology. Institute of Oceanology named after P.P. Shirshova]. (Russ. ed.: Vinogradov M.E., Lappo S.S.). M.: Nauka. Fizika. Himija. Biologija, 2004. vol. 13. 51 p. (In Russ.).
 54. Rybalko A.E., Tokarev M.Ju., Subetto D.A., Aleshin M.I., Beljaev P.Ju., Saveleva L.A., Kuznecov V.Ju. [The use of seismoacoustic methods in the study of large lakes to solve stratigraphic, paleogeographic and geocological problems]. *Ozera Evrazii: problemy i puti ih reshenija: Materialy II Mezhdunarodnoj konferencii [The land of Eurasia: problems and ways to solve them: Proceedings of the conference]*. Kazan: Akademija nauk Respubliki Tatarstan, 2019. pp. 314-318. (In Russ.).
 55. Chernyh D.V. Razrabotka metodov i programmnyh sredstv akusticheskogo zondirovanija vodnoj tolshhi i dna okeana v zonah razgruzki metana [Development of methods and software tools for acoustic sounding of the water column and the ocean floor in methane discharge zones]. M.: 2014. 167 p. (In Russ.).
 56. Kapravlov E.G., Koshkarev A.V, Tikunov V.S. i dr. Geoinformatika: Ucheb. dlja stud. Vuzov [Geoinformatics: Textbook for university students]. (Russ. ed.: Tikunova V.S.). M.: Izdatcentr «Akademija», 2005. 480 p. (In Russ.).
 57. Zelencov V.A., Potrjasaev S.A., Pimanov I.Ju. [The Choice of the Architecture of Systems for Integration of Heterogeneous Information Resources in the Complex

- Modeling of Natural and Technical Objects]. Informatizacija i svjaz – Informatization and communication. 2021. № 7. pp. 72-77. (In Russ.).
58. Zelentsov V.A., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Pimanov I.Y., Ponomarenko M.R., Potryasaev S.A., Semenov A.E., Sobolevskii V.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. A model-oriented system for operational forecasting of river floods. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. vol. 89. № 4. pp. 405-417.
59. Mylnikov D.Ju. Geoinformacionnye platformy. 3-ja red. Politerm [Geoinformation platforms. 3rd ed. Polyterm]. Available at: https://www.politerm.com/articles/obzor_gis.pdf. (accessed 26.10.2022) (In Russ.).
60. Zakharov K., Saveliev A. Algorithm for Edge Detection of Floodable Areas, Based on Heightmap Data. 16th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" (ER(ZR)-2021). 2021. vol. 232. pp. 211-222. doi: 10.1007/978-981-16-2814-6_19.
61. Krylenko I., Alabyan A., Alekseyuk A., Sazonov A., Zavyalova E., Belikov V., Pimanov I., Potryasaev S., Zelentsov V. Modeling ice-jam floods in the frameworks of an intelligent system for river monitoring. Water Resources. 2020. vol. 47. № 3. pp. 387-398.
62. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Pimanov I.Y., Ponomarenko M.R. Integrated use of GIS, remote sensing data and a set of models for operational flood forecasting. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 2019. pp. 477-483.
63. Mochalov V.F., Grigorieva O.V., Markov A.V., Ivanets M.O., Zelentsov V.A. Intelligent technologies and methods of tundra vegetation properties detection using satellite multispectral imagery. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. vol. 986. pp. 234-243.
64. Zelentsov V.A., Potryasaev S.A., Semenov A.E. Information system for analyzing negative impacts on forests of the border regions. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. vol. 806. p. 012001. doi: 10.1088/1755-1315/806/1/012001.
65. Sobolevskii V.A. The system of convolution neural networks automated training. CEUR Workshop Proceedings. 2021. vol. 2803. p. 100-106. doi 10.24412/1613-0073-2803-100-106.
66. Mikhailov V., Ponomarenko M., Sobolevsky V. Simulation of phytomass dynamics of plant communities based on artificial neural networks and NDVI. Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (2nd Edition). Proceedings of 2nd Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-2), Tunisia, 2019. Springer, 2021. p. 1335-1339. doi: 10.1007/978-3-030-51210-1_211.
67. Ronzhin A.L., Zelencov V.A., Bogomolov A.V., Kuleshov S.V. [Technologies for visualization, processing of spatial data, monitoring and proactive management of the development of ecosystems in the North-West region.]. V sbornike: Informacionnye tehnologii i vysokoproizvoditelnye vychislenija. Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [Information Technology and High Performance Computing: Collection]. (Russ. ed.: Namm R.V. i dr.). Habarovsk: 2021. pp. 207-213. (In Russ.).
68. Sokolov B.V., Zakharov V.V., Krylov A.V., Salukhov V.I. Models and algorithms for planning and scheduling of complex objects functioning and modernization. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. vol. 330 LNNS. pp. 610-618.
69. Sokolov B.V., Yusupov R.M. Scientific basis of management and cybernetics methodologies integration. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. vol. 442 LNNS. pp. 52-59.
70. Ogij O.G., Osipov V.Y., Tristanov A.B., Zhukova N.A. Tasks and performance indicators of intelligent neural network support for decisions on managing labor

- potential of the fishery complex. *Marine intelligent technologies*. 2021. № 4-4 (54). pp. 73-79.
71. Nagoev Z.V., Nagoeva O.V., Pshenokova I.A., Bzhikhatlov K.C., Gurtueva I.A., Kankulov S.A. Multiagent neurocognitive models of the processes of understanding the natural language description of the mission of autonomous robots. *Studies in Computational Intelligence*. 2022. vol. 1032 SCI. pp. 327-332.
 72. Nagoev Z., Pshenokova I., Nagoeva O., Sundukov Z. Learning algorithm for an intelligent decision making system based on multi-agent neurocognitive architectures. *Cognitive Systems Research*. 2021. vol. 66. pp. 82-88.
 73. Dudakova D., Anokhin V., Dudakov M., Judin S. Mapping Rocky Coastal Landscapes in Northern Lake Ladoga around the islands of Raipatsaari and Lussikainluoto. GEOHAB 2019 Marine geological and biological habitat mapping. Saint-Petersburg, 2019. pp. 51-52.
 74. Lamkov I.M., Chermoshencev A.Ju., Arbuzov S.A., Guk A.P. [Study of the possibilities of using a quadrocopter to monitor the line of a flooded quarry for the purpose of state cadastral registration]. *Vestnik SGUGiT – Vestnik SGUGiT*. 2015. vol. 1 (29). pp. 200-209. (In Russ.).
 75. Ovchinnikova N.G., Nicenko I.A. [The use of unmanned aerial vehicles in the monitoring of water bodies]. *Jekonomika i jekologija territori-alnyh obrazovanij – Economics and ecology of territorial entities*. 2022. vol. 6. no 1. pp. 87–94. (In Russ.).
 76. Otchet o rabote po teme «Ocenka vozmozhnosti sozdaniya opytnogo rajona primeneniya bespilotnyh aviacionnyh sistem dlja vypolnenija servisno-transportnyh zadach» [Report "Assessment of the possibility of creating an experimental area for the use of unmanned aerial systems to perform service and transport tasks"] Shifr «Tajga 1». Tomsk: 2018. 138 p. (In Russ.).
 77. Ruben M.A.Je. Razrabotka i issledovanie fotogrammetricheskikh tehnologij monitoringa beregovoj linii po materialam ajerofotosemki [Development and research of photogrammetric technologies for coastline monitoring based on aerial photography]. M.: 2016. 97 p. (In Russ.).
 78. Volkov A., Teslya N., Moskvitin G., Brovin N., Bochkarev E. Spatio-temporal Data Sources Integration with Ontology for Road Accidents Analysis. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2022. vol. 444 LNBIP. pp. 251–262. doi: 10.1007/978-3-031-04216-4_23.
 79. Erashov A., Krestovnikov K. Algorithm for controlling manipulator with combined array of pressure and proximity sensors in gripper. *Electromechanics and Robotics*. 2021. vol. 232. pp. 61-71. doi: 10.1007/978-981-16-2814-6_6.
 80. Krestovnikov K., Cherskikh E., Bykov A. Approach to Choose of Optimal Number of Turns in Planar Spiral Coils for Systems of Wireless Power Transmission. *Elektronika ir Elektrotehnika*. 2020. vol. 26. no. 6. doi: 10.5755/j01.eie.26.6.26181.
 81. Kozyr P., Erashov A., Saveliev A. Algorithm for Determining Target Point of Manipulator for Grasping an Object Using Combined Sensing Means. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Data Science and Intelligent Systems. 2021. vol. 231. pp. 337-350. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_27.

Dudakova Dina — Ph.D., Researcher, Laboratory of hydrobiology, IL RAS - SPC RAS. Research interests: hydrobiology, meiobenthology, periphytology, study of biological invasions, underwater landscape science, underwater geology and geomorphology, biogeochemistry. The number of publications — 98. judina-d@yandex.ru; 9, Sevastyanov St., 196105, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)387-0260.

Anokhin Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Leading researcher, Laboratory of geography and hydrology, IL RAS - SPC RAS. Research interests: geomorphology, geomorphological

features of the structure of the bottom and shores of Lake Ladoga. The number of publications — 136. vladanokhin@yandex.ru; 9, Sevastyanov St., 196105, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)387-0260.

Dudakov Mikhail — Engineer, Laboratory of complex problems of limnology, IL RAS - SPC RAS. Research interests: technical support and automation of measuring instruments for limnological studies. The number of publications — 34. mike814@yandex.ru; 9, Sevastyanov St., 196105, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)387-0260.

Ronzhin Andrey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Professor of the RAS, Director, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: human-machine interaction technologies, artificial intelligence, robotics. The number of publications — 400. ronzhin@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)328-3311.