Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства

В. П. Якушев[1], Н. Н. Дубенок[2], Е. А. Лупян[3]

[1] *Агрофизический научно-исследовательский институт*
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mail: vyakushev@agrophys.ru

[2] *Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва, 127550, Россия*

[3] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

Недоиспользование методов и средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) существенно ограничивает возможности инновационных технологий точного земледелия и мелиорации. В работе представлены обзор актуальных направлений исследований в этой области и некоторые результаты, полученные в последние годы ИКИ РАН (Институт космических исследований), АФИ (Агрофизический научно-исследовательский институт), РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, ВИЗР (Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений) и другими организациями, которые отражены в статьях настоящего специального выпуска журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Представленный обзор наглядно показывает, что спутниковые данные уже сегодня способны повысить качество и масштабы информационного обеспечения сельского хозяйства. В последние десятилетия фактически произошла революция в этой области, которая связана как с появлением новых высококачественных спутниковых систем наблюдения Земли и с изменением политики доступа к ним, так и с разработкой новых информационных технологий обработки, анализа и использования дистанционных данных. В работе приведена возможная структурная схема организации системных исследований по созданию и внедрению новых методов и технологий использования данных ДЗЗ в точном земледелии и мелиорации. Отмечается, что для развития систем точного земледелия и мелиорации в настоящее время необходима принципиально новая методологическая, физико-техническая и экспериментальная база. Подчёркивается роль сопряжённых дистанционных и наземных исследований на специализированных тестовых полигонах по получению опорной информации, созданию и совершенствованию нормативной базы технологий точного земледелия и их апробации в полевых условиях. Отмечается, что в настоящее время в России созданы как базовая методическая, так и технологическая основы для проведения системных исследований по использованию данных ДЗЗ для решения различных задач сельского хозяйства, в первую очередь для развития современных технологий точного земледелия и мелиорации.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, оптические характеристики растений, мониторинг сельскохозяйственных земель, точное земледелие, мелиоративные системы, математические модели, алгоритмы, тестовые полигоны, информационно-измерительные системы, программные средства, фитосанитарная безопасность

Одобрена к печати: 23.05.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23

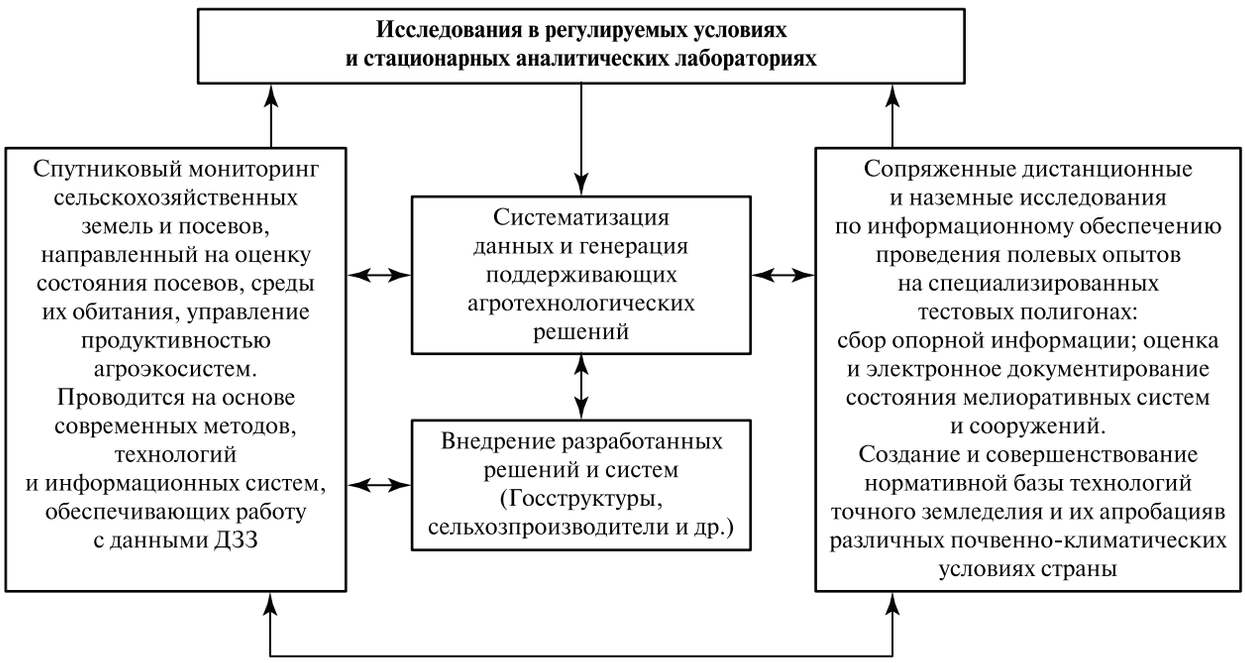
Переход к высокопродуктивному, ресурсосберегающему и экологически чистому производству в сельском хозяйстве предполагает формирование в России глобально-конкурентоспособного и инновационного сценария его развития. Инновационный вариант производства в АПК, в соответствии с указом президента России № 204 от 7 мая 2018 г. «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», должен базироваться на внедрении цифровых технологий и платформенных решений «умного сельского хозяйства». Наиболее отвечающей принципам «умного сельского хозяйства»

в настоящее время является цифровая технология точного земледелия, в основе научной концепции которой лежат представления о практически повсеместном существовании в пределах каждого сельскохозяйственного поля природной пространственно-временной неоднородности, которую необходимо учитывать при планировании и выполнении различных агроприёмов. Точное земледелие занимается разработкой стратегии и тактики технического и информационного обеспечения систем земледелия, включая новые методы, приборы, стационарные и мобильные информационно-измерительные комплексы, программно-аппаратные средства. При этом основополагающими являются выработка и реализация технологических приёмов дифференцированного управления продукционным процессом сельскохозяйственных посевов с учётом биологической специфики культуры и сорта, локальных условий почвенного питания растений и микроклиматических особенностей территории. Набор дифференцированных технологических воздействий зависит от выявленной изменчивости и степени неоднородности характеристик почв и/или растительного покрова того или иного сельскохозяйственного поля. В решении данной задачи перспективным масштабируемым ресурсом информационного обеспечения являются спутниковые данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Спутниковые данные ДЗЗ уже сегодня позволяют существенно повысить качество и масштабы информационного обеспечения сельского хозяйства. Эти вопросы в настоящее время активно обсуждаются на различных научных мероприятиях и конференциях, а также в публикациях. При этом отмечается, что нужно активно развивать методы и технологии использования информации, получаемой на основе данных дистанционного зондирования, для оценки различных характеристик сельскохозяйственных земель и посевов, необходимых для решения задач эффективного земледелия. Требуется также создавать новые технологии и информационные системы, обеспечивающие возможность работы с данными дистанционного мониторинга на различных уровнях. Настоящая работа посвящена обзору основных результатов, полученных в последние годы по данным направлениям, которые были представлены на II научной конференции «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве» (Агрофизический научно-исследовательский институт (АФИ), 26–28 сентября 2018 г., http://agrophys.ru/node/332) и XVI научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), 12–16 ноября 2018 г., http://conf.rse.geosmis.ru).

Основными темами дискуссии на этих конференциях стали современные возможности и тенденции развития технологий спутникового мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. Также активно обсуждались вопросы применения математических моделей, систем и алгоритмов обработки, комплексирования и интерпретации данных дистанционного зондирования в задачах планирования и управления производством растениеводческой продукции. Представленные и рассмотренные на конференциях доклады показывают, что в последнее десятилетие фактически произошла революция в этой области, которая связана как с появлением новых высококачественных спутниковых систем ДЗЗ, так и с изменением политики доступа к ним и разработкой новых информационных технологий обработки и использования данных ДЗЗ.

На основе докладов и обсуждений, прошедших на II научной конференции «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве», был подготовлен ряд публикаций (Блохин и др., 2019; Дубенок и др., 2019; Зейлигер и др., 2019; Кочерина, 2019; Матвеенко и др., 2019; Музылев и др., 2019; Павлюшин, Лысов, 2019; Труфляк и др., 2019; Шпанев, 2019; Якушев и др., 2019), которые представлены в настоящем специальном выпуске журнала. Эти работы посвящены различным аспектам современного состояния и ряду перспективных направлений исследований по использованию данных ДЗЗ в сельском хозяйстве. Анализ докладов и обсуждений, представленных на конференции, а также подготовленных по её результатам публикаций позволил, в частности, сформировать структурную схему организации системных исследований по созданию и внедрению новых методов и технологий использования данных ДЗЗ в точном земледелии и мелиорации. Эта схема приведена на *рисунке* (см. с. 13).



Структурная схема организации системных исследований по созданию и внедрению новых методов и технологий использования данных ДЗЗ в точном земледелии и мелиорации

Следует отметить, что во многом перспективы спутникового мониторинга (см. *рисунок*, левая часть) в прецизионном производстве растениеводческой продукции связаны с развитием современных технологий и информационных систем, обеспечивающих работу с распределёнными сверхбольшими архивами постоянно пополняющихся данных ДЗЗ. Именно благодаря быстрому развитию подобных технологий и систем в последние годы появились новые возможности организации эффективной работы с данными дистанционного зондирования как при проведении различных научных исследований, так и при внедрении их результатов в практическую деятельность. Ниже мы приведём лишь некоторые примеры таких разработок, которые более детально описаны в статьях, вошедших в настоящий сборник.

На сегодняшний день разработан базовый алгоритм обнаружения и выделения границ внутриполевой неоднородности (Якушев и др., 2019), который основан на использовании гиперспектральных снимков и оптических критериев (индексов отражения), характеризующих специфические и неспецифические особенности спектральных показателей посева при воздействии различных стрессоров. Существенные различия оптических характеристик растений, испытывающих дефицит азота и воды, являются надёжным обоснованием реализуемости предложенного алгоритма. Данное обстоятельство открывает новые возможности автоматизации процесса дешифрирования спутниковых данных ДЗЗ, используемых в прецизионном сельскохозяйственном производстве, а также инициирует проведение научных исследований по поиску оптических критериев, позволяющих выявлять действие других стрессоров, угнетающих растения, и фиксировать границы их негативного влияния на заданном поле.

Ассимиляция спутниковых данных ДЗЗ с различными математическими моделями значительно расширяет возможности оценки и прогноза состояния почвенно-растительных систем агроландшафтов. Математическая модель SWAP использовалась, например, для оценки водного стресса орошаемых посевов люцерны, кукурузы и сои на территории Саратовского Заволжья (Зейлигер и др., 2019). Для этих целей она включала блоки описания водного и теплового режимов для системы «атмосфера—агроценоз—почва—грунтовые воды», а также массивы данных для формирования граничных условий и гидравлических характеристик почвенно-грунтовой толщи. Граничные условия были сформированы по результатам наземного и спутникового мониторинга, а также диспетчерского контроля реализации поливов сельскохозяйственных

посевов. В результате были установлены связи рассчитанных величин накопленного за период вегетации водного стресса отдельных посевов с урожайностью. Оценки характеристик водного и теплового режимов территории части Центрально-Чернозёмного региона были получены с помощью модели вертикального влаго- и теплообмена поверхности суши с атмосферой LSM (Land Surface Model) при использовании спутниковой информации о состоянии подстилающей поверхности и метеорологических условиях. В число рассчитываемых с помощью модели характеристик входят влагозапасы почвы, суммарное испарение, вертикальные тепловые потоки, температура подстилающей поверхности, влажность и температура почвы на разных глубинах (Музылев и др., 2019).

Для развития систем точного земледелия необходима принципиально новая методологическая, физико-техническая и экспериментальная база (см. *рисунок*, правая часть), дающая основу для отработки агроприёмов прецизионного производства и информационного обеспечения, соответствующего уровню новых технологий. Традиционная практика получения информации, её переработки и представления не соответствует требуемому уровню технологий точного земледелия по полноте её пространственного распределения и достоверности. Нужны мобильные и стационарные средства сопряжённого наземного и дистанционного мониторинга почвенно-климатических условий, новые методы планирования прецизионных опытов, а также надёжный инструментарий оценки агроэкологического состояния посевов и сред их обитания, оснащённый отечественной навигационной аппаратурой систем ГЛОНАСС/GPS. Крайне важно создание современной научно-технической платформы (см. *рисунок*, блок обработки в центре), обеспечивающей построение и реализацию интеллектуальных систем оптимального планирования технологических решений, а также генерацию производственно-технологического спектра оперативных возможностей и предложений по прецизионному управлению урожайностью с учётом складывающихся погодных, почвенных и хозяйственно-экономических условий.

В настоящее время исследовательская работа по данным направлениям сконцентрирована на биополигоне АФИ. Здесь проводятся длительные стационарные опыты с внесением удобрений (агроэкологический и агрофизический стационары) и целая серия детализирующих опытов по защите растений. Экспериментальная база АФИ является центром коллективного пользования региональных образовательных и научно-исследовательских учреждений, которые проводят здесь свои многолетние полевые исследования. На полях АФИ были заложены первые в нашей стране опыты по точному земледелию и начиная с 2004 г. проводится дистанционный мониторинг агроэкосистем с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Исследования в области дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем ведутся в АФИ с 2010 г. За это время разработана методика и методологические основы изучения оптических характеристик фитосанитарного состояния посевов, накоплены данные по проявлению различных фитосанитарных ситуаций в агроценозах на Северо-Западе РФ (Шпанев, 2019). Результаты многолетнего изучения фитосанитарного состояния агроэкосистем биополигона АФИ свидетельствуют о типичности видового и численного состава вредных организмов, характерного для Ленинградской и соседних областей. Таким образом биополигон АФИ представляет собой мощную экспериментальную базу для разработки научных основ и апробации полученных результатов в области дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем применительно к условиям Северо-Запада России.

Исследование оптических характеристик культурных растений, почвы и сорной растительности проводилось на опытных полях Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (ВИЗР) и Тосненской опытной станции защиты растений (филиал ВИЗР) (Павлюшин, Лысов, 2019) с помощью оптико-электронных датчиков, работающих в видимой и инфракрасной областях спектра. Определение спектральных характеристик излучения изучалось в полевых условиях на ячмене, картофеле, капусте и сорной растительности: лопухе паутинистом, крапиве двудомной, полыни обыкновенной, хвоще полевом. Одновременно получались спектральные характеристики излучения почвы в посадках данных культур. Их анализ показал, что спектральные характеристики отражения вегетирующих

культурных, сорных растений и почвы имеют чёткие различия по величине значений отражательной способности. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования этого метода при дистанционном геокодированном сборе информации о неоднородности распределения сорной растительности для дифференцированного внесения средств защиты растений.

Многолетние исследования на полях биополигона АФИ показали высокую эффективность применения различных агроприемов оперативного прецизионного управления азотным режимом яровой пшеницы, основанных на проксимальном и аэрозондировании посевов. Выполнение агроприёмов на основе проксимального зондирования осуществлялось с использованием импортного оптического прибора N-сенсора и различалось в зависимости от методов его калибровки. Установлено, что все способы дифференцированного внесения азотных удобрений не только обеспечивают получение более высокой урожайности и продукции лучшего качества в сравнении с традиционной высокоинтенсивной технологией, но и существенно сокращают расход удобрений, а также снижают антропогенное воздействие сельхозпроизводства на окружающую среду. Наиболее эффективным оказался прецизионный агроприем проведения азотных подкормок по картам-заданиям, сгенерированным на основе аэрофотоснимков посевов, дешифрированных с использованием тестовых площадок. Учитывая, что средняя стоимость N-сенсора составляет на сегодняшний день 60 000 евро, а оснастить им нужно каждый трактор, используемый для проведения азотных подкормок, только крупные агрохолдинги могут позволить себе приобретение такой техники. При этом технология азотных подкормок на основе дешифрированных аэрофотоснимков посевов позволяет обойтись без использования дорогих импортных азотных сенсоров проксимального зондирования и является менее затратной. Так, например, использование БПЛА, стоимость которого составляет 26 000 евро, позволяет за одну рабочую смену произвести аэрофотосъёмку площадью около 6000 га. Программное обеспечение, с помощью которого можно выделять технологические зоны и генерировать карты-задания, стоит 1500 евро. Таким образом, разработанная в Агрофизическом институте агротехнология существенно сокращает издержки на внедрение точного земледелия в хозяйствах. Кроме того, весь технологический цикл выполняется полностью в автоматическом режиме и позволяет оперативно в течение одного дня оценить потребность посева в азотном питании и провести дифференцированную подкормку (Матвеенко и др., 2019). Важно отметить, что с 2018 г. на биополигоне АФИ начала функционировать комплексная измерительная система, в состав которой входят WSN (wireless sensor network — сеть беспроводных датчиков) и приборы для маршрутного обследования полей (Блохин и др., 2019). Состав WSN: автоматическая семиканальная метеорологическая станция с интернет-каналом передачи данных на сервер, являющаяся базовой станцией для остальных сенсорных узлов WSN; сенсорные узлы, состоящие из датчиков, микропроцессорного блока, трансивера и антенны; сервер, на котором происходит сбор и обработка данных, получаемых с базовой станции и приборов для маршрутного обследования полей. Кроме того, в перечень приборов входят скважинный влагомер для исследования профиля влажности почвы и штыревой влагомер для маршрутного обследования полей. Метеостанция используется для измерения температуры и относительной влажности воздуха, температуры почвы, скорости ветра, количества осадков за различные периоды времени, фотосинтетически активной радиации и радиационного баланса земной поверхности. Комплексированная пространственно-атрибутивная информация поступает в базу данных системы ГИС-АФИ и используется для интерпретации данных дистанционного зондирования (ДДЗ) в опытах по прецизионному производству растениеводческой продукции.

Важнейшую роль в обеспечении продовольственной безопасности играет эффективное использование имеющихся в стране мелиорированных земель. В работе (Дубенок и др., 2019) выполнен детальный анализ состояния мелиоративного фонда России, представленного 9,1 млн га, в числе которых чуть более 4,3 млн га орошаемых земель и около 4,8 млн га осушаемых. Участившиеся в последние годы засухи приводят к огромным потерям урожая и недобору основных кормовых культур для животноводства. Использование мелиорированных земель может стать высокопродуктивным и устойчивым по объёму производства

сельскохозяйственной продукции сегментом аграрной экономики только при достаточном ресурсном его обеспечении. Ресурсное обеспечение Российской Федерации позволяет увеличить площади как орошаемых, так и осушаемых земель до уровня, необходимого для гарантии продовольственной безопасности страны. Проведён анализ причин переувлажнения почвы и повторного заболачивания земель. Обследование осушенных мелиорированных земель по действующим методикам позволяет выявить только локальные неисправности мелиоративной системы. Более точно определить участок, на котором мелиоративная система вышла из строя, возможно только дистанционно, по снимкам, изображающим всю систему, включая водоприёмник, транспортирующие каналы и другие гидротехнические сооружения. Предложена методика дистанционного обследования технического состояния осушительных мелиоративных систем для автоматизации проектирования ремонта объектов мелиорации.

Комплексный анализ данных почвенных и растительных образцов полевых опытов в сравнении с результатами продукционного процесса при круглогодичном интенсивном-выращивании сельскохозяйственных культур в регулируемых условиях (см. *рисунок*, верхняя часть) с широким управляемым варьированием свето-температурных и других условий позволяет существенно ускорить исследования в области земледелия, мелиорации, физиологии растений, генетики, селекции, микробиологии, экологии, почвоведении, агрохимии. Применительно к полевой и регулируемой агроэкосистемам можно считать подобными процессы усвоения лучистой энергии растениями при фотосинтезе и преобразование её в энергию химической связи. Общность и универсальность закономерностей и процессов в регулируемой и полевой агроэкосистемах открывает возможность использования получаемых результатов в регулируемых условиях для решения проблем повышения продуктивности и устойчивости природных агроландшафтов. Примером использования данных дистанционного зондирования в генетико-селекционных работах являются индексы диффузного отражения листьев культурного растения, полученные с помощью спектрометра HR 2000 (Ocean Optics, США) в регулируемых условиях (Кочерина, 2019). Эти показатели нужны для дальнейшего их анализа в молекулярно-генетическом картировании так называемых локусов количественных признаков индексов отражения в контролируемых условиях выращивания. Картирование локусов хромосом, вовлечённых в проявление изучаемых физиологических признаков отражения листовой пластинки, позволяет установить, помимо локализации на хромосомах идентифицированных локусов количественных признаков, ещё и какой родительской формой была привнесена та или иная аллель, а также процент фенотипической изменчивости, определяемый выявленным и картированным локусом количественного признака. Это способствует эффективному выявлению перспективных генотипов с желательными хозяйственно ценными признаками. Такой подход может применяться для продуктивного отбора перспективных генотипов при селекции культурных растений по хозяйственно ценным параметрам не только в контролируемых условиях агроэкобиополигона, но и в дальнейшем в полевых условиях. Кроме того, знания о детерминантах, определяющих проявление различного рода хозяйственно ценных признаков растений, позволяет более эффективно управлять их продуктивностью в рамках реализации программ точного земледелия.

Следует отметить, что при проведении системных исследований, направленных на использование данных ДЗЗ в точном земледелии и мелиорации, одним из путей эффективной систематизации данных и выработки различных практических решений и рекомендаций (см. *рисунок*, центральных блок) является создание научных экспертных центров. Так, в 2016 г. на базе Кубанского государственного аграрного университета (КубГАУ) в рамках государственного задания Минсельхоза России был создан Центр прогнозирования и мониторинга научно-технологического развития в области технологий точного сельского хозяйства как постоянно действующая коммуникационная площадка для взаимодействия вузов, научных организаций и компаний соответствующего профиля. Для мониторинга и прогнозирования сформирована сеть экспертов по точному сельскому хозяйству из научного и образовательного сообщества, бизнеса и производства (155 экспертов из 35 регионов). Как показывает проведённое анкетирование, 96 % экспертов полагают, что в ближайшие 10–15 лет приоритетом научно-технологического развития АПК следует считать переход к цифровым

интеллектуальным технологиям и роботизированным системам. Мониторинг состояния посевов с использованием дистанционного зондирования 91 % экспертов считают важным технологическим трендом в области обеспечения точного земледелия. В 2018 г. Центр прогнозирования и мониторинга КубГАУ при участии Государственного университета по землеустройству (Москва) совместно с ВНИИ риса (пос. Белозерный Краснодарского края) начал освоение технологий точного земледелия по выращиванию, сохранению и уборке урожая (Труфляк и др., 2019). Для этого на специально выделенных однородных делянках был проведён посев некоторых сортов риса разными моделями сеялок: СН-16 (заводской вариант, имеющийся в хозяйстве) и КЛЕН-1.5П (разработка КубГАУ). Для дистанционного наблюдения за вегетацией риса использовался беспилотный летательный аппарат. Съёмка осуществлялась как в видимом диапазоне спектра, так и в ближней ИК-зоне. Применялись также и наземные методы контрольных измерений высоты и количества растений для дальнейшего сравнительного анализа полученных данных дистанционного мониторинга. На основании наземных и дистанционных исследований установлено, что после посева сеялкой КЛЕН-1.5П количество всходов было на 53 % больше, чем при посеве сеялкой СН-16, при одной норме высева семян, длина метёлки перед уборкой — на 6 % выше, урожайность — на 12 ц/га больше.

В заключительной части работы кратко рассмотрена созданная на сегодняшний день в России технологическая основа для проведения исследований, направленных на использование данных ДЗЗ в точном земледелии и мелиорации. Следует подчеркнуть, что в последние годы фактически происходит революция в развитии спутниковых систем ДЗЗ. Отмечается рост числа высококачественных систем наблюдения Земли, увеличивается частота и пространственное разрешение спутниковой информации, доступной для организации постоянного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. Всё это позволяет не только вести различные научные разработки, но и создавать и внедрять на их основе различные информационные системы дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. В то же время нельзя не отметить, что расширение возможностей современных спутниковых систем ДЗЗ привело к практически взрывному росту объёмов доступной для использования информации (см., например, (Лупян и др., 2018)). Поэтому для организации эффективной работы с данными, поступающими от современных систем ДЗЗ, потребовалось создание принципиально новых технологий, которые должны не только обеспечивать возможности доступа к сверхбольшим архивам спутниковых данных, но и предоставлять средства для их анализа, а также создания, ведения и поддержки различных информационных систем дистанционного мониторинга. Такие работы активно проводятся в России в последнее десятилетие (Лупян и др., 2011а, 2012, 2015б, 2018; Прошин и др., 2016). Развитие подобных технологий позволило создать и внедрить в России современные информационные системы, обсуждению возможностей которых было посвящено значительное число пленарных и секционных докладов на XVI научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». По результатам докладов и обсуждений подготовлен ряд публикаций, которые также вошли в настоящий специализированный выпуск журнала. Следует отметить, что существенная часть этих работ посвящена вопросам создания информационных систем, ориентированных на проведение исследований в области развития методов и технологий дистанционного мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. Ниже представлено краткое описание основных возможностей таких систем.

Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа данных спутниковых наблюдений Института космических исследований Российской академии наук для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (*ЦКП «ИКИ-Мониторинг»*, *http://ckp.geosmis.ru/*). Создан в 2012 г. В настоящее время поддерживается и развивается в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Основной целью создания ЦКП было развитие принципиально новой инфраструктуры для работы с данными ДЗЗ, предназначенной для решения различных научных и прикладных задач и обеспечивающей не только доступ к многолетним, постоянно пополняющимся архивам спутниковых данных, но и функционал для их обработки и анализа. Возможности центра достаточно подробно представлены

в работах (Лупян и др., 2015а, 2019). В его состав входит система распределённой работы с данными Вега-Science (http://sci-vega.ru/), значительная часть функциональности которой ориентирована на решение задач исследования и мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. Эта система детально описана в целом ряде публикаций (в том числе в (Барталев и др., 2016; Лупян и др., 2011б)). Сегодня Вега-Science позволяет вести мониторинг и исследование процессов, связанных с наблюдением, оценкой и прогнозированием состояния сельскохозяйственных земель на различных уровнях интеграции на территории России и сопредельных государств. Возможности системы используют более 20 различных научных организаций и университетов, ведущих исследования в обсуждаемом направлении. Опыт использования ЦКП «ИКИ-Мониторинг» показывает, что он служит хорошей технологической основой для проведения системных исследований по получению и использованию данных ДЗЗ в точном земледелии и мелиорации. Следует также отметить, что центр сегодня является источником спутниковых данных и результатов их обработки для различных специализированных информационных систем дистанционного мониторинга, ориентированных на исследование, контроль и оценку состояния сельскохозяйственных земель и посевов.

Информационная система VEGA-GEOGLAM (*http://vega.geoglam.ru*). Создана ИКИ РАН в рамках проекта SIGMA (http://www.geoglam-sigma.info), ориентированного на разработку технологий для реализации системы глобального мониторинга сельского хозяйства GEOGLAM (http://www.geoglam.org), и проекта Минобрнауки РФ № 2015-14-588-0003-4500. Основной задачей системы является обеспечение возможности работы со спутниковыми данными распределённых исследовательских групп, выполняющих различные проекты по созданию методов мониторинга сельскохозяйственных земель и культур в разных странах и регионах мира, в первую очередь в интересах проекта GEOGLAM (GEO Global Agricultural Monitoring). В системе создан ряд инструментов, позволяющих проводить совместный анализ данных ДЗЗ и контактных измерений, в том числе на тестовых участках JECAM (http://jecam.org). VEGA-GEOGLAM также предоставляет возможность работы с наземными и дистанционными наблюдениями, выполненными на тестовых участках в различных регионах, которые используются для выполнения конкретных исследовательских проектов. Система ориентирована на разработку новых методов, основанных на интеграции наземных наблюдений и спутниковых данных наблюдения Земли, в том числе позволяющих прогнозировать влияние производства сельскохозяйственной продукции на экосистемы и природные ресурсы. При проведении таких разработок наземные наблюдения являются одним из важнейших источников информации. Источниками наземных наблюдений в системе могут выступать различные организации и проекты, такие как исследовательские институты, группы и коммерческие компании, заинтересованные в создании новых технологий дистанционного мониторинга сельского хозяйства. Технологическую основу для VEGA-GEOGLAM обеспечивает инфраструктура работы с данными, реализованная в рамках ЦКП «ИКИ-Мониторинг», в том числе система распределённой обработки со сверхбольшими, постоянно пополняющимися архивами спутниковых данных и результатов их обработки. Достаточно подробно возможности системы и перспективы её развития описаны в работе (Толпин и др., 2019).

Модуль работы с данными ДЗЗ Единой федеральной информационной системы земель сельскохозяйственного назначения (*ЕФИС ЗСН*, *http://pro-vega.ru/efis/*). Важно отметить, что разработанные в России технологии работы с данными ДЗЗ в интересах мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов в настоящее время активно внедряются в практику, в том числе для решения задач федерального и регионального уровней. Одним из примеров является создание в составе ЕФИС ЗСН (Козубенко, 2018) подсистемы работы с данными ДЗЗ. Система была разработана для поддержки принятия управленческих решений Министерства сельского хозяйства Российской Федерации и введена в эксплуатацию приказом Минсельхоза РФ от 02.04.2018 № 130. ЕФИС ЗСН обеспечивает сбор, хранение, обработку и анализ сведений о землях сельскохозяйственного назначения, предоставляемых подведомственными Минсельхозу РФ учреждениями и региональными органами управления агропромыш-

ленным комплексом. Одной из важных частей системы является модуль работы с данными дистанционного зондирования Земли, разработанный на базе сервиса «ВЕГА-PRO». Модуль предоставляет доступ к спутниковым данным различного пространственного разрешения и разных спектральных диапазонов, получаемых с зарубежных и российских космических аппаратов (в том числе со спутников Terra, AQUA, Landsat-7, -8, Sentinel-1, -2, «Метеор-М», «Канопус-В», «Ресурс-П» и др.). Он обеспечивает возможность работы с различными информационными продуктами, получаемыми на основе спутниковых данных, а также их анализа (блок «Аналитик ДЗЗ ЕФИС ЗСН»). Подробно модуль описан в работе (Буланов и др., 2019), в которой представлены его текущие возможности и перспективы развития, ориентированные в первую очередь на совершенствование механизма осуществления государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения.

Таким образом, вполне очевидно, что в настоящее время в России уже создана база для развития технологий дистанционного, прежде всего спутникового, мониторинга в интересах сельского хозяйства. Особенно важно отметить, что на сегодняшний день разработана базовая методическая и технологическая основа для проведения системных исследований по использованию данных ДЗЗ для решения различных задач, в первую очередь для развития современных технологий точного земледелия и мелиорации.

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Блохин Ю. И.*, *Белов А. В.*, *Блохина С. Ю.* Комплексная система контроля влажности почвы и локальных метеоусловий для интерпретации данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 87–95.
3. *Буланов К. А.*, *Денисов П. В.*, *Лупян Е. А.*, *Мартьянов А. С.*, *Середа И. И.*, *Трошко К. А.*, *Толпин В. А.*, *Барталев С. А.*, *Хвостиков С. А.* Блок работы с данными дистанционного зондирования Земли Единой федеральной информационной системы о землях сельскохозяйственного назначения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 171–182.
4. *Дубенок Н. Н.*, *Янко Ю. Г.*, *Петрушин А. Ф.*, *Калиниченко Р. В.* Перспективы использования данных дистанционного зондирования в оценке состояния мелиоративных систем и эффективности использования мелиорированных земель // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 96–104.
5. *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.*, *Музылев Е. Л.*, *Старцева З. П.*, *Сухарев Ю. И.* Компьютерный анализ режимов водного стресса орошаемых агроценозов с использованием SWAP-модели, а также данных наземного и космического мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 33–43.
6. *Козубенко И. С.* Почвенная информация в аналитическом центре Минсельхоза России // Бюл. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. 2018. Вып. 92. С. 3–15. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-92-3-15.
7. *Кочерина Н. В.* Молекулярно-генетическая характеристика данных дистанционно-оптических методов в целях эффективного отбора генотипов для селекции растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 105–109.
8. *Лупян Е. А.*, *Мазуров А. А.*, *Назиров Р. Р.*, *Прошин А. А.*, *Флитман Е. В.*, *Крашенинникова Ю. С.* (2011а) Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.
9. *Лупян Е. А.*, *Савин И. Ю.*, *Барталев С. А.*, *Толпин В. А.*, *Балашов И. В.*, *Плотников Д. Е.* (2011б) Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («ВЕГА») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
10. *Лупян Е. А.*, *Саворский В. П.*, *Шокин Ю. И.*, *Алексанин А. И.*, *Назиров Р. Р.*, *Недолужко И. В.*, *Панова О. Ю.* Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 21–44.
11. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* (2015а)

Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 247–267.

12. *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Бурцев М. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Кобец Д. А.*, *Крашенинникова Ю. С.*, *Мазуров А. А.*, *Назиров Р. Р.*, *Прошин А. А.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.*, *Флитман Е. В.* (2015б) Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 53–75.
13. *Лупян Е. А.*, *Бурцев М. А.*, *Прошин А. А.*, *Кобец Д. А.* Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
14. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Кашницкий А. В.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Константинова А. М.*, *Кобец Д. А.*, *Мазуров А. А.*, *Марченков В. В.*, *Матвеев А. М.*, *Радченко М. В.*, *Сычугов И. Г.*, *Толпин В. А.*, *Уваров И. А.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170.
15. *Матвеенко Д. А.*, *Якушев В. В.*, *Якушев В. П.* Прецизионное управление азотным режимом яровой пшеницы на основе дистанционного зондирования посевов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 79–86.
16. *Музылев Е. Л.*, *Старцева З. П.*, *Зейлигер А. М.*, *Ермолаева О. С.*, *Волкова Е. В.*, *Василенко Е. В.*, *Осипов А. И.* Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 44–60.
17. *Павлюшин В. А.*, *Лысов А. К.* Фитосанитарная безопасность агроэкосистем и дистанционный фитосанитарный мониторинг в защите растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 69–78.
18. *Прошин А. А.*, *Лупян Е. А.*, *Балашов И. В.*, *Кашницкий А. В.*, *Бурцев М. А.* Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
19. *Толпин В. А.*, *Барталев С. А.*, *Ёлкина Е. С.*, *Кашницкий А. В.*, *Константинова А. М.*, *Лупян Е. А.*, *Марченков В. В.*, *Плотников Д. Е.*, *Патил В. К.*, *Сунил Дж. К.* Информационная система VEGA-GEOGLAM — инструмент разработки методов и подходов использования данных спутникового дистанционного зондирования в интересах решения задач глобального сельскохозяйственного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 183–197.
20. *Труфляк Е. В.*, *Скубиев С. И.*, *Цыбулевский В. В.*, *Малашихин Н. В.* Дистанционный мониторинг посевов риса и алгоритм выявления неоднородностей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 110–124.
21. *Шпанев А. М.* Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 61–68.
22. *Якушев В. П.*, *Канаш Е. В.*, *Якушев В. В.*, *Матвеенко Д. А.*, *Русаков Д. В.*, *Блохина С. Ю.*, *Петрушин А. Ф.*, *Митрофанов Е. П.* Новые возможности автоматизации процесса обнаружения внутриполевой неоднородности по гиперспектральным снимкам и оптическим критериям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 24–32.

Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects

V. P. Yakushev[1], N. N. Dubenok[2], E. A. Loupian[3]

[1] *Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia*
E-mail: vyakushev@agrophys.ru
[2] *Russian State Agrarian University –*
Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow 127550, Russia
[3] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

Underutilization of methods and means of remote sensing of the Earth significantly limits the capabilities of precision agriculture and irrigation novel technologies. The paper presents a survey of actual research areas in this field and certain results obtained by Space Research Institute, Agrophysical Research Institute, Moscow Timiryazev Agricultural Academy, All-Russian Research Institute of Plant Protection and other institutions, also published in this special issue of *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. The survey clearly shows that satellite data can improve the quality and scope of information support of agriculture today. In recent decades, there has actually been a revolution in this area due to the appearance of new high-quality Earth observation systems, data access policy improvement and development of new information technologies for remote sensing data processing, analysis and application. The paper presents a possible organizational chart of system research on development and implementation of new methods and technologies of Earth sensing data application in precision agriculture and irrigation. It is noted that a fundamentally new methodological, physico-engineering and experimental framework is required for precision agriculture and irrigation systems development. Also the contribution of associated remote and in-situ researches on obtaining the reference information, development and improvement of regulatory framework of precision agriculture technologies and their approbation in the field in specific test areas is highlighted. It is noted that both basic procedural and technological frameworks for system research on Earth remote sensing data application for various agriculture tasks, primarily for the development of modern precision agriculture and irrigation technologies, exist in Russia at the present moment.

Keywords: remote sensing data, vegetation optical properties, farmlands monitoring, precision agriculture, melioration systems, mathematical models, algorithms, test areas, data measuring systems, software, phytosanitary security

Accepted: 23.05.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
2. Blokhin Yu. I., Belov A. V., Blokhina S. Yu., Kompleksnaya sistema kontrolya vlazhnosti pochvy i lokal'nykh meteouslovii dlya interpretatsii dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Integrated system for control of soil moisture and local weather conditions for remote sensing data interpretation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 87–95.
3. Bulanov K. A., Denisov P. V., Loupian E. A., Martyanov A. S., Sereda I. I., Troshko K. A., Tolpin V. A., Bartalev S. A., Khvostikov S. A., Blok raboty s dannymi distantsionnogo zondirovaniya Zemli Edinoi federal'noi informatsionnoi sistemy o zemlyakh sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya (Remote sensing unit of Integrated Federal Information System on Agricultural Lands), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 171–182.
4. Dubenok N. N., Yanko Yu. G., Petrushin A. F., Kalinichenko R. V., Perspektivy ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya v otsenke sostoyaniya meliorativnykh sistem i effektivnosti ispol'zovaniya melioririovannykh zemel' (Remote sensing data in land-reclamation systems and reclaimed land management assessment), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 96–104.

5. Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Muzylev E. L., Startseva Z. P., Sukharev Yu. I., Komp'yuternyi analiz rezhimov vodnogo stressa oroshaemykh agrotsenozov s ispol'zovaniem SWAP-modeli, a takzhe dannykh nazemnogo i kosmicheskogo monitoringa (Computer analysis of water stress regimes of an irrigated agrocoenosis using the SWAP model and ground and space monitoring data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 33–43.
6. Kozubenko I. S., Pochvennaya informatsiya v analiticheskom tsentre Minsel'khoza Rossii (Soil information in the analytical center of the ministry of agriculture of Russia), *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, Vol. 92, pp. 3–15, DOI: 10.19047/0136-1694-2018-92-3-15.
7. Kocherina N. V., Molekulyarno-geneticheskaya kharakteristika dannykh distantsionno-opticheskikh metodov v tselyakh effektivnogo otbora genotipov dlya selektsii rastenii (Molecular genetic characterization of remote-optical methods data for the effective selection of genotypes for plant breeding), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 105–109.
8. Loupian E. A., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Flitman E. V., Krasheninnikova Yu. S. (2011a), Tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Technologies for Building Remote Monitoring Information Systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 26–43.
9. Loupian E. A., Savin I. Yu., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Balashov I. V., Plotnikov D. E. (2011b), Sputnikovyi servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti ("VEGA") (Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
10. Loupian E. A., Savorskii V. P., Shokin Yu. I., Aleksanin A. I., Nazirov R. R., Nedoluzhko I. V., Panova O. Yu., Sovremennye podkhody i tekhnologii organizatsii raboty s dannymi distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya resheniya nauchnykh zadach (Up-to-date Approaches and Technology Arrangement of Earth Observation Data Applications Aimed to Solve Scientific Tasks), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 21–44.
11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A. (2015a), Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
12. Loupian E. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Kobets D. A., Krasheninnikova Yu. S., Mazurov A. A., Nazirov R. R., Proshin A. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Flitman E. V. (2015b), Sozdanie tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Development of information systems design technologies), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 53–75.
13. Loupian E. A., Burtsev M. A., Proshin A. A., Kobets D. A., Razvitie podkhodov k postroeniyu informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Evolution of remote monitoring information systems development concepts), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 53–66, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
14. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenkov V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Opyt ekspluatatsii i razvitiya tsentra kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh (TsKP "IKI-Monitoring") (Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170.
15. Matveenko D. A., Yakushev V. V., Yakushev V. P., Pretsizionnoe upravlenie azotnym rezhimom yarovoi pshenitsy na osnove distantsionnogo zondirovaniya posevov (Precision management of the nitrogen status of spring wheat crops based on remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 79–86.
16. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Osipov A. I., Ispol'zovanie sputnikovykh dannykh o kharakteristikakh podstilayushchei poverkhnosti i meteorologicheskikh kharakteristikakh pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov bol'shogo sel'skokhozyaistvennogo regiona (The use of satellite data on land surface and meteorological characteristics in modeling the water and heat regimes of large agricultural region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 44–60.

17. Pavlyushin V. A., Lysov A. K., Fitosanitarnaya bezopasnost' agroekosistem i distantsionnyi fitosanitarnyi monitoring v zashchite rastenii (Phytosanitary safety of agro-ecological systems and remote phytosanitary monitoring in plant protection), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 69–78.
18. Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V., Kashnitskiy A. V., Burtsev M. A., Sozdanie unifitsirovannoi sistemy vedeniya arkhivov sputnikovykh dannykh, prednaznachennoi dlya postroeniya sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 9–27, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
19. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Elkina E. S., Kashnitskii A. V., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Marchenkov V. V., Plotnikov D. E., Patil V. C., Sunil J. K., Informatsionnaya sistema VEGA-GEOGLAM — instrument razrabotki metodov i podkhodov ispol'zovaniya dannykh sputnikovogo distantsionnogo zondirovaniya v interesakh resheniya zadach global'nogo sel'skokhozyaistvennogo monitoringa (The VEGA-GEOGLAM information system: a tool for the development of methods and approaches to using satellite remote sensing data in problem-solving tasks of global agricultural monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 183–197.
20. Truflyak E. V., Skubiev S. I., Tsybulevsky V. V., Malashikhin N. V., Distantsionnyi monitoring posevov risa i algoritm vyyavleniya neodnorodnostei (Rice crops remote monitoring and heterogeneities detection algorithm), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 110–124.
21. Shpanev A. M., Eksperimental'naya baza dlya distantsionnogo zondirovaniya fitosanitarnogo sostoyaniya agroekosistem na Severo-Zapade RF (Experimental basis for remote sensing of phytosanitary condition of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 61–68.
22. Yakushev V. P., Kanash E. V., Yakushev V. V., Matveenko D. A., Rusakov D. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Mitrofanov E. P., Novye vozmozhnosti avtomatizatsii protsessa obnaruzheniya vnutripolevoi neodnorodnosti po giperspektral'nym snimkam i opticheskim kriteriyam (Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 24–32.