

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ОСУШИТЕЛЬНЫХ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ РЕГИОНЕ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

А. Ф. Петрушин, Ю. Г. Янко, О. А. Митрофанова, Е. П. Митрофанов
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14
E-mail: apetrushin@agrophys.ru

Поступила в редакцию 21.11.2022, принята к печати 31.05.2023

В Северо-Западном регионе Российской Федерации осушительная мелиорация имеет огромное значение, так как даже незначительное переувлажнение может серьезно повлиять на величину конечной продукции сельскохозяйственного производства. Оперативность принятия решений чрезвычайно важна для определения оптимальных сроков и дат проведения агротехнологических операций: обработки почвы, посева, подкормки, т. к. водно-воздушный режим корнеобитаемого слоя влияет на величину и качество урожая. На мелиорируемых землях развитие сельскохозяйственных культур во время вегетации непосредственно связано с состоянием осушительной системы.

Мелиоративные системы нуждаются в постоянном систематическом обслуживании, а в случае выхода из строя – в капитальном ремонте. Во времена строительства осушительной мелиорации на каждые 1000 га создавался мелиоративный отряд для обслуживания построенных объектов. В настоящее время создаются крупные агрохолдинги, включающие в себя десятки тысяч гектар мелиорируемых земель, однако стремление к снижению издержек приводит к тому, что более 17 тыс. га обслуживает всего три мелиоративные бригады.

В статье предложен метод оценки состояния и эффективности мелиоративных систем на основе мониторинга вегетационного индекса NDVI по данным дистанционного зондирования. Такой подход позволяет оценить состояние осушительной системы и оптимизировать логику ее обслуживания и ремонта. Преимущества использования данного подхода рассмотрены на примере одного из холдингов Северо-Запада РФ.

Ключевые слова: осушительная мелиорация, мониторинг агроландшафтов, геоинформационные системы, данные дистанционного зондирования.

**DETERMINING THE STATE OF DRAINAGE SYSTEMS USING DATA OF REMOTE SENSING IN THE
NORTH-WEST REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION**

A. F. Petrushin, Yu. G. Yanko, O. A. Mitrofanova, E. P. Mitrofanov
Agrophysical Research Institute
14, Grazhdansky pr., St. Petersburg, 195220
E-mail: apetrushin@agrophys.ru

In the North-Western region of the Russian Federation, drainage reclamation is of great importance, since even slight waterlogging can seriously affect the value of the final product. Efficiency in decision-making is extremely important for determining the optimal timing and dates for agrotechnological operations: tillage, sowing, fertilizing, because. The state of the water-air regime of the root layer affects the size and quality of the crop. On reclaimed lands, the development of agricultural crops during the growing season is directly related to the state of the drainage system.

Reclamation systems require constant, systematic maintenance, and in the event of their failure, then a major overhaul. During the construction of drainage reclamation, for every 1000 ha. a reclamation detachment was created to service the constructed facilities. Nowadays, large agricultural holdings are being created, which include tens of thousands of hectares of reclaimed land, but the desire to reduce costs leads to the fact that more than 17 thousand hectares serves only three reclamation teams.

The article proposes a method for assessing the state and efficiency of reclamation systems based on monitoring the vegetation index NDVI according to remote sensing data. This approach allows assessing the state of the drainage system and optimizing the logistics of maintenance and its repair using the example of one of the holdings in the North-West of the Russian Federation.

Key words: drainage melioration, monitoring of agricultural landscapes, geoinformation systems, remote sensing data.

ВВЕДЕНИЕ

Смена экономической формации после распада Советского Союза, отчуждение сельхозземель частным собственникам при сохранении федеральной

и региональной собственности на объекты капитального строительства мелиоративных систем, многократное снижение финансирования мелиоративных хозяйственных организаций привели к

существенному ухудшению состояния мелиоративной системы Калининградской области. Большая часть мелиоративного хозяйства пришла в упадок, водотоки заросли кустарником и заилились. Многие дамбы находятся в полуразрушенном состоянии. Фактически были утрачены первичные документы, которые хранились у балансодержателей мелиоративных систем.

В настоящее время управление производством растениеводческой продукции требует применения современных средств и методов информационного обеспечения. Наиболее перспективными направлениями мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий и сбора необходимой информации для принятия управленческих решений являются дистанционные оптические методы получения и анализа цифровых изображений посевов и среды их обитания (Якушев и др., 2019; Денисов и др., 2021). Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) представляет собой процесс получения информации без непосредственного контакта с изучаемым объектом. Оценка состояния посевов, почв и мелиоративных систем возможна на основе измерения собственного или отраженного излучения изучаемого объекта в оптическом или радиолокационном диапазонах (Коберниченко и др., 2013; Янко и др., 2020).

Одним из важнейших средств повышения плодородия почвы и урожайности сельскохозяйственных культур является мелиорация земель. В Северо-Западном регионе России погодные условия позволяют достигать высоких показателей урожайности на мелиорированных осушенных землях без дополнительных затрат на полив при использовании прогрессивных технологий в растениеводстве. Своевременный контроль мелиоративного состояния мелиорированных земель позволяет на основе полученных данных судить о водно-воздушном режиме почв, сроках прекращения сбросов воды с осушаемых территорий, аккумуляции дренажного стока, определять сроки дополнительного увлажнения и оперативного отвода избыточной влаги при паводковых ситуациях (Гулюк и др., 2020).

Результаты наблюдений и обследований используются для разработки мероприятий по улучшению мелиоративного состояния мелиорированных земель и обеспечению их оптимального водно-воздушного режима в течение всего вегетационного периода. Проведение наблюдений и обследований является весьма дорогостоящим мероприятием, достоверность полученных показателей в некоторых случаях сомнительна, а убытки сельскохозяйственных предприятий от неисправности мелиоративных систем довольно значительны и составляют около 20 % только в результате недобора урожая. Для получения высоких урожаев на осушенных землях необходимо осуществлять своевременный уход и ремонт мелиоративных систем (Гулюк, 1999). Крупные агрохолдинги, как правило, имеют в штате мелиоративные бригады, но для экономически целесообразного ухода за мелиоративными системами необходимо организовать постоянный мониторинг

мелиоративного состояния земель (ГОСТР 58376-2019). Самый главный показатель эффективности производства сельскохозяйственных культур – это величина и качество урожая, однако он, как правило, усредняется по полю, либо по нескольким полям, что не позволяет выделить однородные зоны продуктивности.

Целью исследования являлась разработка подхода к оценке качества работы дренажа в масштабе хозяйства для дальнейшей расстановки приоритетов по проведению восстановительных работ мелиоративными бригадами.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись сельскохозяйственные угодья агрохолдинга Калининградской области. Калининградская область обладает рядом особенностей, отличающих ее от большинства субъектов Российской Федерации, в частности – обширными низинными территориями. В области располагается более 70% польдерных земель России. Значительная часть территории расположена ниже уровня моря (до –1,6 м). При этом сельскохозяйственные земли региона имеют высокий производственный потенциал. Большая часть польдерных земель находится в Неманской низменности (территории Славского и Полесского районов). Осушительная мелиорация сельскохозяйственных, лесных и селитебных земель охватывает территорию общей площадью порядка 10,5 тыс. км² (около 80% территории) и обеспечивает возможность эффективного ведения хозяйственной деятельности, а в значительной части региона – и возможность проживания населения. Суммарная протяженность осушительной сети области составляет свыше 5 тыс. км. Многие речные системы, особенно в дельте Немана, долине р. Преголи и на побережьях Куршского и Калининградского заливов, используются в качестве водоприемников откачиваемых с польдерных земель вод.

Площадь возделываемых земель холдинга составляет 17594 га, их обслуживают три мелиоративные бригады. Средняя производительность одной бригады при ремонте осушительной сети составляет 200–250 га в год (Лихацевич, 2015). Помимо ремонта имеющихся земель, холдинг планирует ежегодно вводить в оборот как минимум 500 га сельхозугодий. Была поставлена задача оперативно определить мелиоративное состояние имеющихся в обороте земель с целью составления оптимального плана работ для мелиоративных бригад.

Как уже было отмечено выше, большинство сельскохозяйственных угодий Калининградской области размещено на мелиорированных землях. В случае, если осушительная система перестает обеспечивать проектные нормы водоотведения, появляются участки с сильным переувлажнением и неудовлетворительном состоянием возделываемых культур (Янко, 2019), признаком которых авторы предлагают считать изменение величины вегетационного индекса NDVI.

Для оценки состояния возделываемых культур на землях холдинга были отобраны космические снимки, сделанные в безоблачную погоду со спутника

Sentinel-2, находящегося в управлении Европейского космического агентства (<http://www.esa.int/>), за весь вегетационный период 2021 г. с 1 апреля по 30 октября. В результате было получено 11 сцен на следующие даты: 19.04, 12.05, 06.06, 16.06, 01.07, 13.07, 26.07,

06.09, 14.09, 29.09, 29.10. Для построения пространственной карты индекса NDVI спутниковые снимки были обработаны в программе QGIS с использованием модуля «Калькулятор растров» (рис. 1).

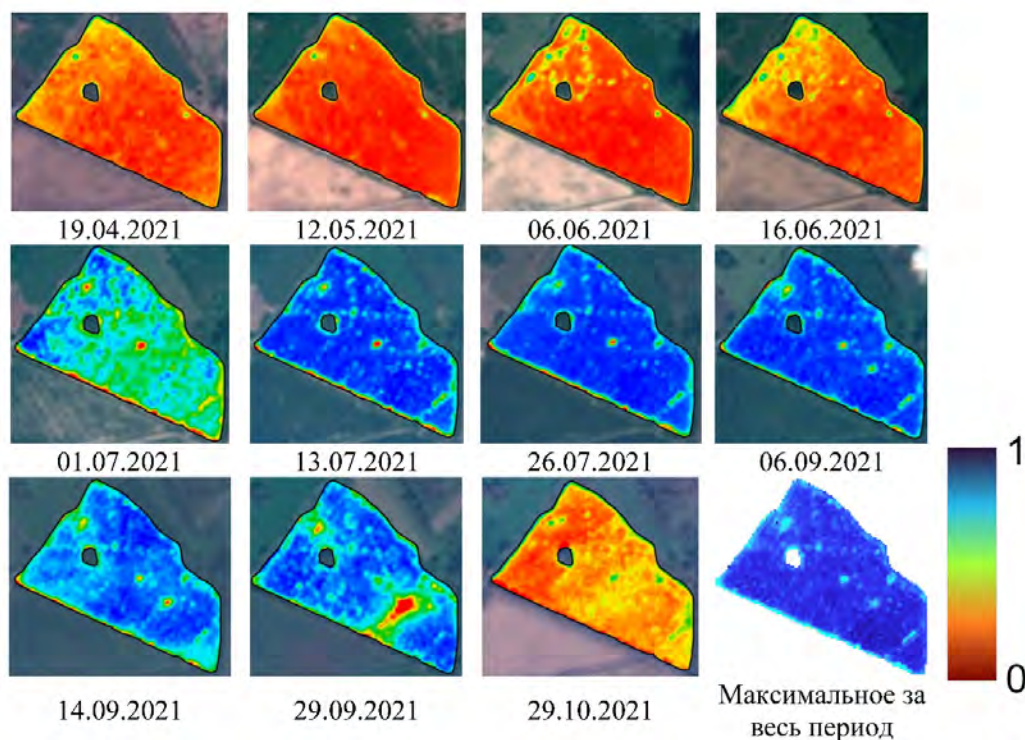


Рис. 1. Рассчитанные значения индекса NDVI для участка № 83 на каждую дату с безоблачной погодой и накопленное максимальное значение индекса

На полях агрохолдинга возделываются зерновые и кормовые культуры, которые имеют разные сроки сева, уборки и периоды созревания. Для оценки внутриполевой вариабельности развития культур авторами предложено определять максимальное значение индекса NDVI за весь период вегетации в каждом пикселе космического снимка. На рис. 1 представлены изображения участка № 83, на котором в 2021 г. возделывалась яровая пшеница. Данный участок приведен в качестве примера как наиболее однородный по накопленному максимальному значению индекса NDVI. Ниже в качестве примера будет рассмотрен рабочий участок

№ 123, на котором также возделывалась яровая пшеница.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Максимальные значения индекса NDVI за период вегетации позволяют судить о состоянии культуры на возделываемом контуре, а также об оптимальности созданных на нем водно-воздушных условий для развития растений. На рис. 2 представлен архивный мелиоративный план участка № 83, на котором видна обширная закрытая осушительная сеть, от работы которой зависит продуктивность возделываемых культур.



Рис. 2. Фрагмент мелиоративного плана участка № 83, осушенного закрытым трубчатым дренажом

При сильном переувлажнении, причиной которого может стать неисправность осушительной сети, растения не могут достичь своего потенциала развития, что просматривается на синтезированных снимках с индексом NDVI. На рис. 3 представлено изображение рабочего участка № 123. На карте максимального NDVI наблюдаются две зоны с

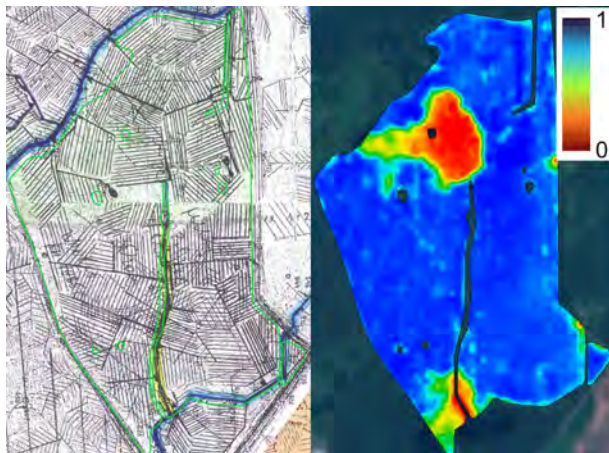


Рис. 3. Фрагмент мелиоративного плана и карта максимального NDVI за период вегетации участка № 123, осушенного закрытым трубчатым дренажом

пониженным значением индекса. Вследствие недостаточного водоотведения из-за неработающей дренажно-коллекторной системы возникли зоны с угнетенными посевами, что проявилось в появлении вымочки, подтвержденном при визуальном осмотре (рис. 4).



Рис. 4. Вымочка на рабочем участке № 123

Количество полей агрохолдинга составляет около 1000. Обработка и оценка информации по такому количеству объектов в ручном режиме займет огромное количество времени и не исключает ошибок, связанных с человеческим фактором. Для автоматизации процесса был предложен метод оценки среднеквадратичного отклонения (СКО) максимального значения NDVI за вегетационный период в каждом оцениваемом контуре. Для этого было использовано свободное программное обеспечение с открытым кодом QGIS (www.qgis.org).

При помощи функции «Зональная статистика», где в качестве исходного слоя использовались поля агрохолдинга в векторном формате, а в качестве растрового файла – данные с максимальным NDVI за период вегетации, был подучен файл, где для каждого контура было установлено значение среднеквадратичного отклонения (СКО) – показатель

рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания. Чем больше значение данной величины, тем более неоднороден контур по развитию сельскохозяйственной культуры и тем больше вероятность того, что на поле возможно появление зон переувлажнения.

Минимальное значение среднеквадратичного отклонения (СКО) составило 0,00511, а максимальное – 0,217. Все полученные значения были разбиты на классы методом Фишера-Дженкса. В итоге было получено распределение по классам, где каждый член класса наиболее однороден внутри и максимально отличается от остальных классов (рис. 5).

В результате группировки контуров (производственных участков) по классам распределения была получена следующая таблица (табл. 1).

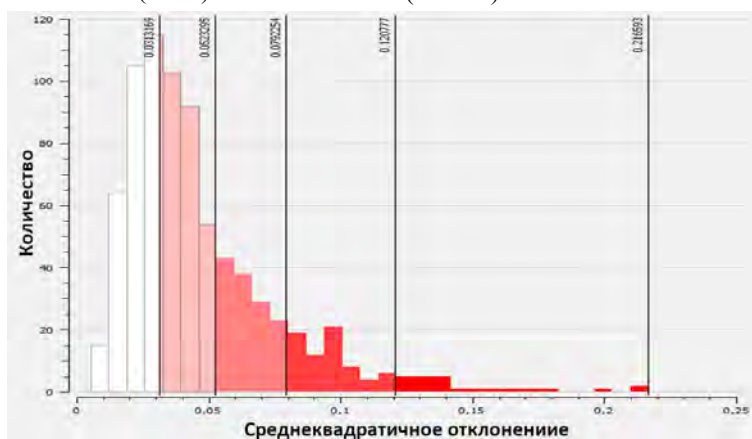


Рис. 5. Распределение коэффициента среднеквадратичного отклонения по классам

Таблица 1. Группировка площадей агрохолдинга по классам распределения СКО

Диапазон СКО	Площадь контуров, га	Процент от общей площади
0,005–0,031	6341,538	36,04%
0,031–0,052	7326,683	41,64%
0,052–0,079	2623,691	14,91%
0,079–0,121	837,134	4,76%
0,121–0,217	464,921	2,64%
Общая площадь	17593,967	

Оценка данных таблицы позволила выявить, что примерно 465 га земель агрохолдинга характеризуются значительным варьированием развития культур внутри поля, что, вероятнее всего, является следствием неблагоприятных для корневой системы выращиваемых культур водно-воздушных условий. Также на 837 га земель выявлены серьезные отклонения в развитии выращиваемых культур, что может являться следствием нарушения либо технологии возделывания, либо водообеспеченности

растений. В общей сложности 7,4% земель агрохолдинга нуждаются в детальном обследовании. На рис. 6 представлена карта рабочих контуров хозяйства, где красным обозначены участки с наибольшей неоднородностью развития возделываемых культур. Полученные данные позволят существенно сократить затраты агрохолдинга на детальное обследование земель и выстроить логику работы для мелиоративных бригад оптимальным образом.

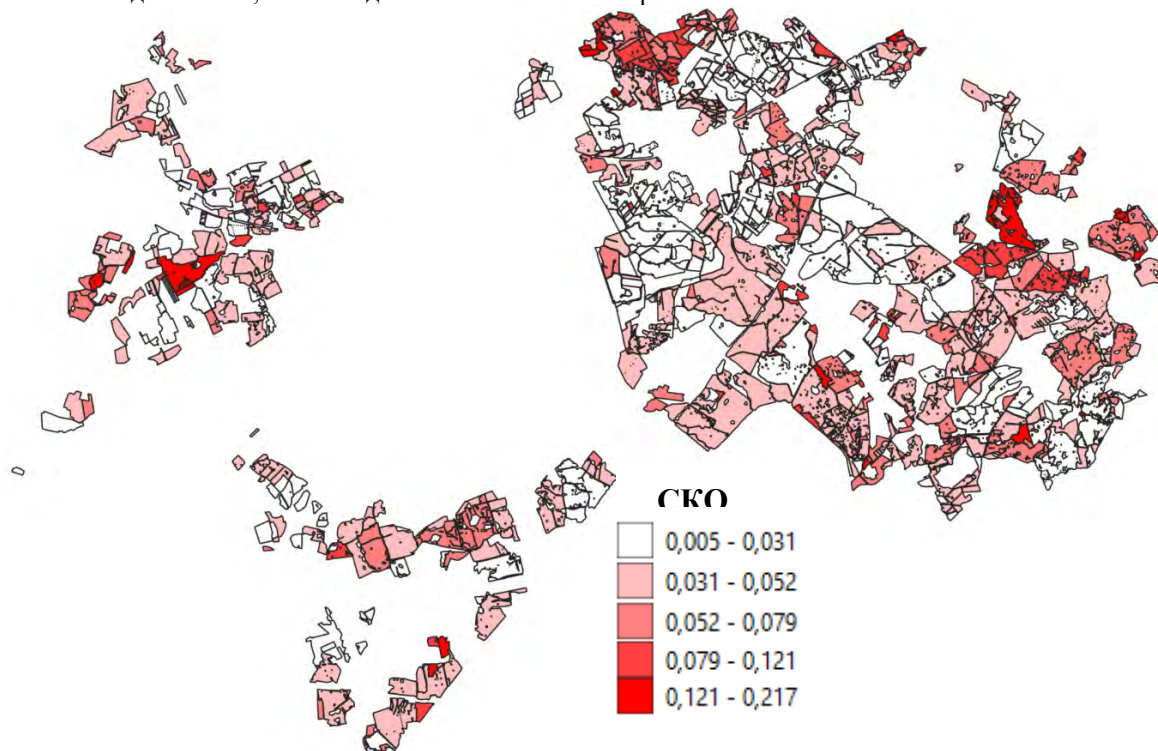


Рис. 6. Контурные агрохолдинга, распределенные по классам: белый цвет – наименьшая неоднородность, красный – наибольшая неоднородность

ВЫВОДЫ

Данные дистанционного зондирования могут успешно применяться для решения широкого круга задач мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий, в том числе для определения состояния мелиоративных систем закрытого и открытого типа.

Визуализация состояния всего мелиоративного комплекса агрохолдинга позволяет принимать обоснованные управленческие решения по проведению текущего ремонта и реконструкции мелиоративных систем, вводу земель в оборот, а также предотвращать потери урожая из-за поднятия уровня грунтовых вод.

Внедрение предложенных методов оценки земель позволит как минимум оперативно локализовать те земельные массивы, на которых происходит недобор урожая (анализ ситуации, сложившейся в 2021 г., показал, что доля таких земель составляет 7,4%), и выработать решения по исправлению ситуации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 2 апреля 2022 г. № 02/2022 и софинансировании Российского научного фонда, грант № 22-26-20082.

Список литературы

- Геостатистика: теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева / Под ред. Р.В. Арутюняна; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: Наука, 2010. 327 с.
- ГОСТ Р 58376-2019. Мелиоративные системы и гидротехнические сооружения, Эксплуатация.
- Гулюк Г. Г. Эффективность работы закрытого дренажа в зависимости от мелиоративных мероприятий и срока действия // Мелиорация и водное хозяйство. 1999. С. 59–62.
- Гулюк Г. Г., Янко Ю. Г., Штыков В. И., Черняк М. Б., Петрушин А. Ф. Руководство по мелиорации полей. СПб., 2020. 219 с.
- Денисов П. В., Середа И. И., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185.
- Лихачевич А. П., Погодин Н. Н., Болбышко В. А., Латушкина Г. В. Оборудование для технического обслуживания закрытой дренажной сети // Мелиорация и водное хозяйство. 2015. № 3. С. 33–35.
- Обработка данных дистанционного зондирования Земли: практические аспекты [учеб. пособие] / [В. Г. Коберниченко, О. Ю. Иванов, С. М. Зраенко и др.; под общ. ред. В. Г. Коберниченко]. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. 168 с.
- Якушев В. П., Дубенок Н. Н., Лупян Е. А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 11–23.
- Янко Ю. Г., Петрушин А. Ф. Методические рекомендации по обследованию осушительных мелиоративных систем дистанционными методами. СПб., 2019.
- Янко Ю. Г., Петрушин А. Ф., Митрофанов Е. П., Старцев А. С., Кузенева Е. Г. Проблемы диагностики неисправностей и ремонта осушительного трубчатого дренажа // Агрофизика. 2020. № 4. С. 55–59.

References

- Geostatistika: teoriia i praktika* [Geostatistics: theory and practice] / V. V. Dem'ianov, E. A. Savel'eva; pod red. R. V. Arutiunian; In-t problem bezopasnogo razvitiia atomnoi energetiki RAN. M.: Nauka, 2010. 327 p.
- GOST R 58376-2019 *Meliorativnye sistemy i gidrotekhnicheskie sooruzheniia, Ekspluatatsiia* [Land reclamation systems and hydraulic structures, Operation]
- Guliuk G. G. Effektivnost' raboty zakrytogo drenazha v zavisimosti ot meliorativnykh meropriatii i sroka deistviia [Efficiency of operation of closed drainage depending on reclamation measures and duration]. *Melioratsiia i vodnoe khoziaistvo*, 1999, pp. 59–62.
- Guliuk G. G., Yanko Yu. G., Shtykov V. I., Cherniak M. B., Petrushin A. F. *Rukovodstvo po melioratsii polei* [Guidelines for the improvement of fields]. SPb., 2020. 219 p.
- Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Lupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A. Vozmozhnosti i opyt operativnogo distantsionnogo monitoringa sostoiianiia ozimyykh kul'tur na territorii Rossii [Opportunities and experience of operational remote monitoring of the state of winter crops in Russia] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 171–185.
- Likhatsevich A. P., Pogodin N. N., Bolbyshko V. A., Latushkina G. V. Oborudovanie dlia tekhnicheskogo obsluzhivaniia zakrytoi drenazhnoi seti [Equipment for maintenance of a closed drainage network]. *Melioratsiia i vodnoe khoziaistvo*, 2015, no.3, pp. 33–35.
- Obrabotka dannykh distantsionnogo zondirovaniia Zemli: prakticheskie aspekty*: [ucheb. posobie] [Earth remote sensing data processing: practical aspects]. / [V. G. Kobernichenko, O. Yu. Ivanov, S. M. Zraenko i dr.; pod obshch. red. V. G. Kobernichenko]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2013. 168 p. Yekaterinburg: Publishing House Ural. un-ta, 2013. 168 p.]
- Yakushev V. P., Dubenok N. N., Lupian E. A. Opyt primeneniia i perspektivy razvitiia tekhnologii distantsionnogo zondirovaniia Zemli dlia sel'skogo khoziaistva [Experience in the application and development prospects of Earth remote sensing technologies for agriculture]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 11–23.
- Yanko Yu. G., Petrushin A. F. *Metodicheskie rekomendatsii po obsledovaniiu osushitel'nykh meliorativnykh sistem distantsionnymi metodami* [Methodical recommendations for the survey of drainage reclamation systems by remote methods.]. SPb, 2019.
- Yanko Yu. G., Petrushin A. F., Mitrofanov E. P., Startsev A. S., Kuzenok E. G. Problemy diagnostiki neispravnostei i remonta osushitel'nogo trubchatogo drenazha [Problems of fault diagnostics and repairment of drying pipe drainage]. *Agrofizika*, 2020, no. 4, pp. 55–59.