

База знаний для мониторинга осушительных мелиоративных систем по данным дистанционного зондирования

Е. П. Митрофанов^{1,2}, О. А. Митрофанова^{1,2}, Ю. Г. Янко¹,
А. Ф. Петрушин¹, В. М. Буре^{1,2}

¹ *Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mail: mjeka89@gmail.com*

² *Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: o.a.mitrofanova@spbu.ru*

Осушительные мелиоративные системы имеют большое значение для сельскохозяйственных территорий с зонами переувлажнения, выделяются открытые (поверхностные) и закрытые (подземные) дренажные объекты. Перспективным направлением для оперативной оценки состояния осушительных мелиоративных систем представляется использование данных дистанционного зондирования. Высоким потенциалом для решения таких задач обладает применение беспилотных летательных аппаратов, которые позволяют получать в сжатые сроки качественные изображения сельскохозяйственной территории в различных спектрах съёмки. В работе в качестве первого этапа решения масштабной задачи автоматизации методов анализа снимков для оценки состояния осушительных комплексов предложена специализированная база знаний (БЗ) основных неисправностей дренажей, подлежащих ремонту, на основе аэрофотоснимков и наземных измерений. Разработанная структура БЗ на базе концептуальной модели может быть оперативно имплементирована в веб-проекты и приложения, позволяя при этом вносить архитектурные изменения. Также на основе многолетних полевых экспериментов выделены наиболее распространённые неисправности объектов дренажных систем.

Ключевые слова: база знаний, онтология, аэрофотосъёмка, дренажные системы, данные дистанционного зондирования

Одобрена к печати: 01.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-163-172

Введение

В последние годы задачи из области управления водными ресурсами в агропромышленном комплексе остаются актуальными. Выделяются, например, такие направления, как картирование показателей влажности почвы (Блохин и др., 2020; Filion et al., 2016), обнаружение водного стресса посевов (Virnodkar et al., 2020) и водных эрозий на сельскохозяйственных полях (Nagiravan et al., 2019), анализ водных индексов (Serrano et al., 2019), дифференцированное орошение растений (Karar et al., 2021) и др. Востребованной задачей, в частности для Северо-Западного региона России, выступает мониторинг осушительных мелиоративных систем, ведь существенная часть сельскохозяйственных земель нашей страны подвержена водной эрозии почв и переувлажнению, где необходим искусственный дренаж. В ходе исследования, проведённого в 2018 г. (Доклад..., 2020), авторы продемонстрировали, что 15 % обследованной площади сельскохозяйственных земель России подвержены водной эрозии, а 5 % — переувлажнению. При этом, по данным Международной комиссии по ирригации и дренажу (англ. International Commission on Irrigation and Drainage — ICID), в состав которой с 1955 г. также входят и представители нашей страны, площадь осушаемых земель в России составляет 5 % от общей площади, а в мире — 11 % (Agricultural..., 2022).

Сельскохозяйственные дренажные системы могут быть как поверхностными (открытые каналы), так и подземными (трубчатый дренаж). Осушительные мелиоративные объекты позволяют устранить эрозии и зоны переувлажнения за счёт удаления избыточной воды, а также улучшают аэрацию почвы за счёт поддержания уровня грунтовых вод на желаемой глубине

(King et al., 2015). В последние десятилетия в России снизились объёмы работ по восстановлению и обслуживанию таких комплексов, сократилось количество специалистов-мелиораторов, большая часть объектов нуждается в реконструкции, а документация и схемы расположения элементов дренажных систем оказались утрачены.

Перспективным направлением для оперативной оценки состояния осушительных мелиоративных систем представляется использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) (Дубенок и др., 2019; Singh, 2016; Таракова, 2017). Высоким потенциалом для решения таких задач обладает применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА), которые позволяют получать в сжатые сроки качественные изображения сельскохозяйственной территории в различных спектрах съёмки (Allred et al., 2020; Nhamo et al., 2020; Turi et al., 2021). В последние годы при обследовании дренажных систем с применением БЛА особое внимание уделяется термосъёмке (Kratt et al., 2020; Prinds et al., 2019; Tilahun, Seyoum, 2021).

Для практического применения подходов, связанных с визуализацией дренажных систем по данным аэрофотосъёмки, используются геоинформационные системы (Culibrk et al., 2014; Singh, 2018). В качестве первого этапа решения масштабной задачи автоматизации методов анализа снимков для оценки состояния осушительных комплексов необходимо сформировать специализированную базу знаний основных неисправностей дренажей, подлежащих ремонту, на основе ДДЗ и наземных измерений.

Объекты и методы

Объект исследования — сельскохозяйственный опытный участок, расположенный на биополигоне Агрофизического научно-исследовательского института (АФИ) в Ленинградской обл. (д. Меньково, Гатчинский р-н). На рассматриваемой территории имеется осушительная мелиоративная система (открытый и закрытый дренажи), заложенная в 1976 г., на *рис. 1* (см. с. 165) представлена её оцифрованная карта-схема. Преимущественно расположение подземных труб имеет характерный ёлочный тип, среднее расстояние между параллельными линиями составляет 10 м.

В ходе исследования проводился мониторинг и анализ неработающих объектов мелиоративного комплекса, а также искусственно формировались неисправности с целью создания базы знаний (БЗ).

Для оперативной визуальной дистанционной оценки состояния осушительных объектов биополигона использовалась беспилотная авиационная система (БАС) «Геоскан-401» с навесной мультиспектральной камерой Micasense RedEdge MX (5 каналов: красный, зелёный, синий, ближний инфракрасный, красный край; спектральный диапазон 400–900 нм), а также БЛА DJI Matrice-600 Pro с гиперспектральной камерой Resonon Pika L (281 канал, спектральный диапазон 400–1000 нм). Пространственное разрешение аэрофотоснимков составляет 5–7 см/пиксель.

Съёмка осушаемой территории проводилась с 2015 г. ежегодно во время вегетационного периода, а также ранней весной и поздней осенью при различных метеоусловиях для сравнения получаемых результатов на изображениях. Для повышения качества геопространственной привязки наземных и дистанционных измерений применялся GNSS-ресивер (*англ.* Global Navigation Satellite System) — RTK Emlid REACH RS2+.

Кроме того, с помощью геоада «Око-3» выполнялись уточнения расположения подземных труб, а также осуществлялись наземные инспекции объектов мелиорации (смотровые колодцы, устья, открытые каналы, трубопереезды и т.п.) с целью фиксации и анализа неисправностей.

Для создания структуры БЗ использован хорошо изученный современный подход (Ngo et al., 2022; Skobelev et al., 2019) — концептуальная модель. По сути, метод заключается в формировании следующих компонент знаний о предметной области: основные понятия и их иерархия, описание ограничений и отношений, а также правила («если, то»). Соответственно, модель *О* (Онтология) представляется в виде совокупности конечных множеств (Ngo et al., 2020):

$$O = (C, T, R),$$

где C — Concepts, множество понятий исследуемой проблематики; T — Transformations, множество преобразований значений сущностей; R — Relations, множество отношений между понятиями.

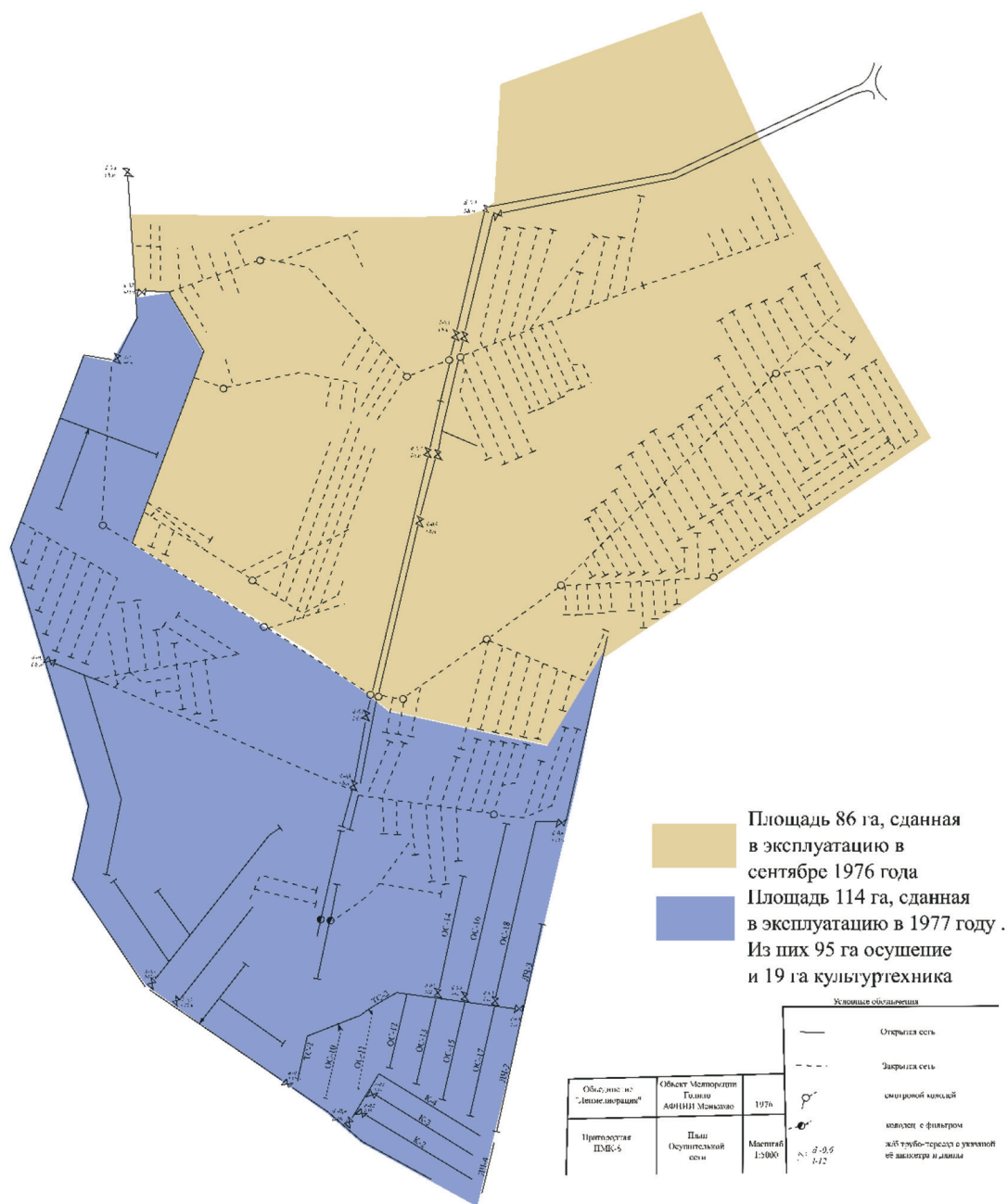


Рис. 1. Оцифрованная карта-схема осушительной мелиоративной системы, заложенной в 1976 г. на участке территории биополигона АФИ

Результаты и их обсуждение

С помощью наземного инспектирования комплекса осушительной мелиорации, в том числе и с применением георадара, было уточнено расположение части дренажных объектов с построением цифровой схемы (рис. 2, см. с. 166) и геопространственной привязкой на основе GNSS-системы.

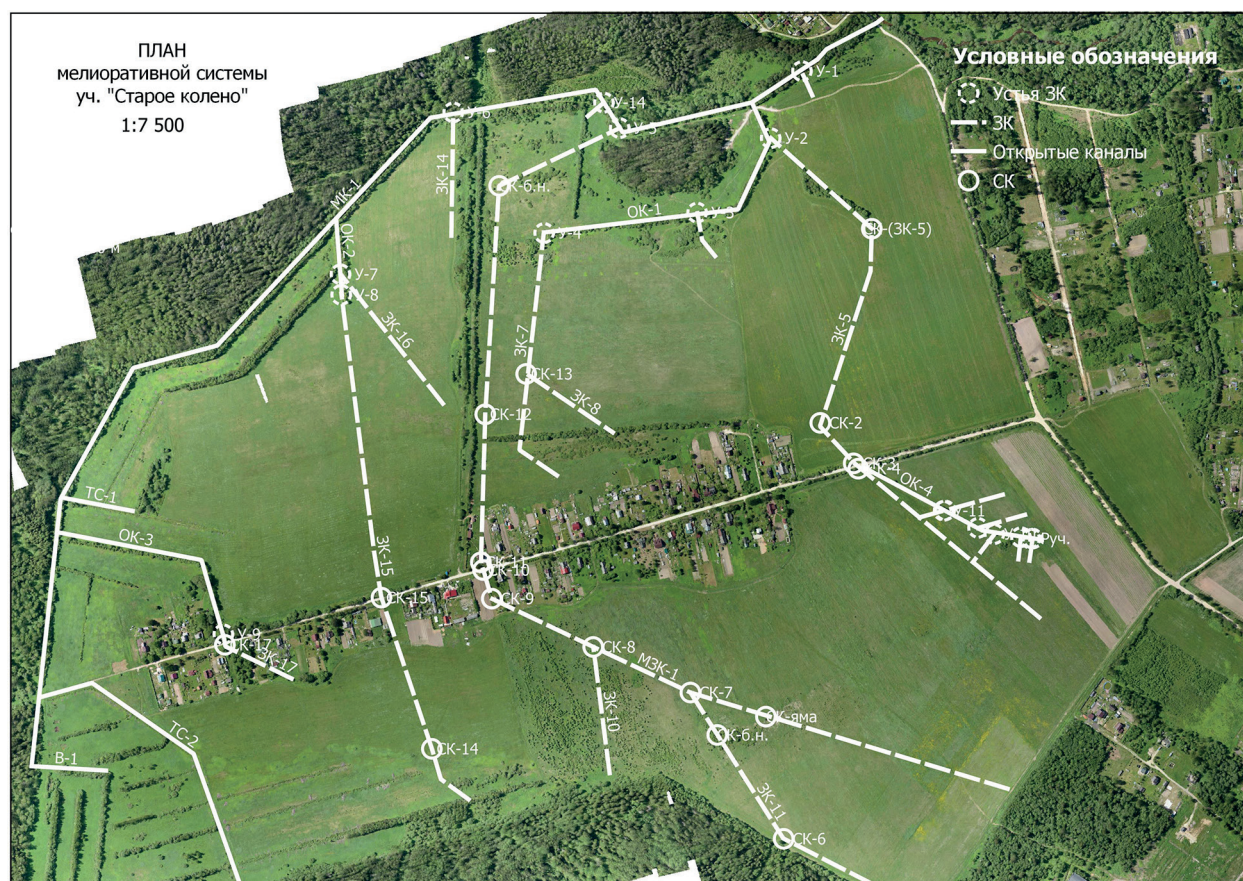


Рис. 2. Цифровая схема расположения осушительных систем, уточнённая с помощью наземной оценки

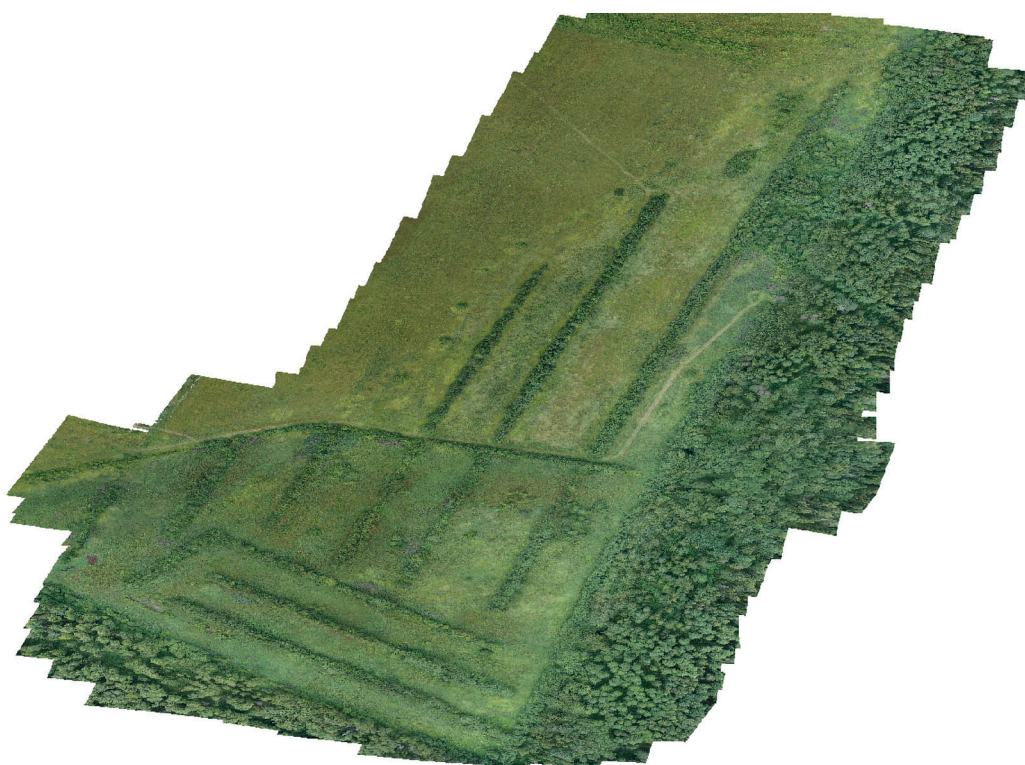


Рис. 3. Визуальное определение неисправности открытой дренажной сети (биополигон АФИ, дата съёмки: 06.07.2019)

В ходе проведения многолетнего исследования были выявлены (в том числе и с применением БАС и БЛА) и проанализированы основные (наиболее часто встречающиеся) неисправности мелиоративных объектов:

- зарастание открытых (поверхностных) каналов;
- неудовлетворительное состояние русла открытого канала (например, заиление);
- уплотнение почвы в несколько слоёв над подземной дренажной сетью;
- неудовлетворительное состояние выпускных отверстий дренажных труб;
- прорастание корневой системы в закрытом (подземном) трубчатом дренаже;
- образование воздушных пробок в подземных дренажных трубах;
- неудовлетворительное состояние смотрового колодца (разрушение, зарастание, заиление).

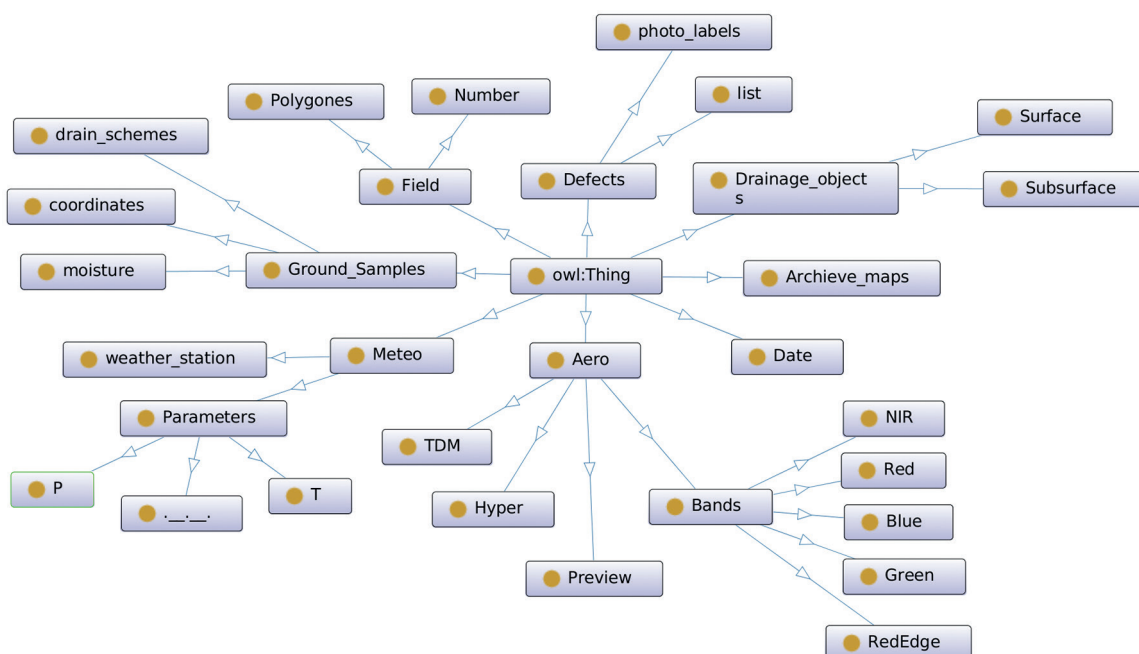


Рис. 4. Граф, отражающий иерархию БЗ

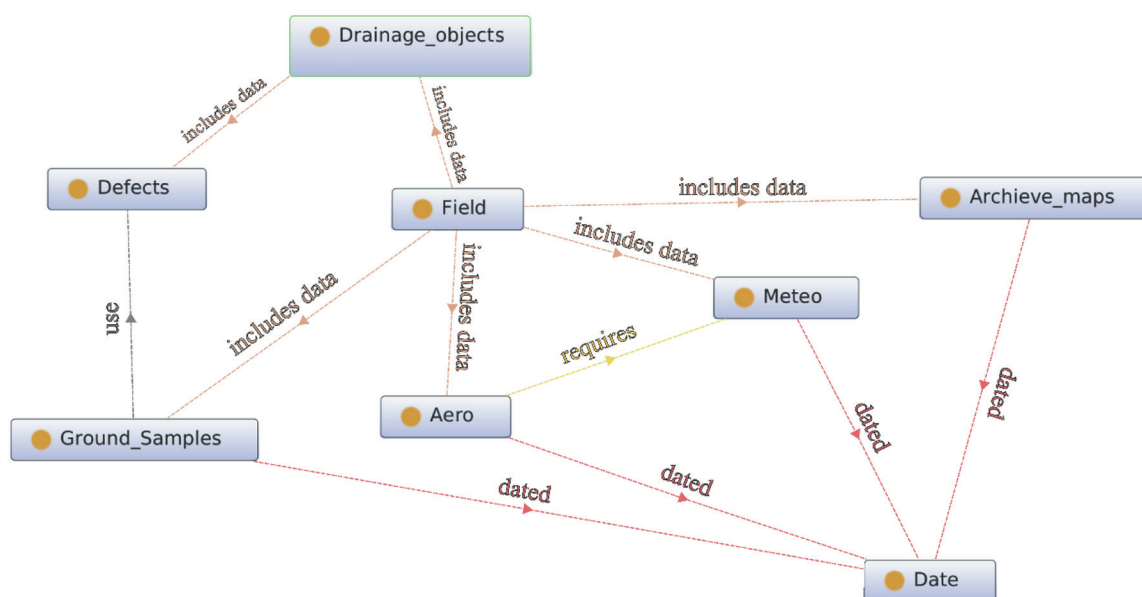


Рис. 5. Граф отношений между базовыми классами

Для определённого типа неисправностей также сформирован датасет (*англ.* dataset, набор данных) из аэрофотоснимков. Так, например, на *рис. 3* (см. с. 166) визуализируется зарастание открытой дренажной сети на всём исследуемом участке (данные подтвердились наземным осмотром), после обнаружения неисправность была устранена (выполнена очистка каналов от растительности и корней).

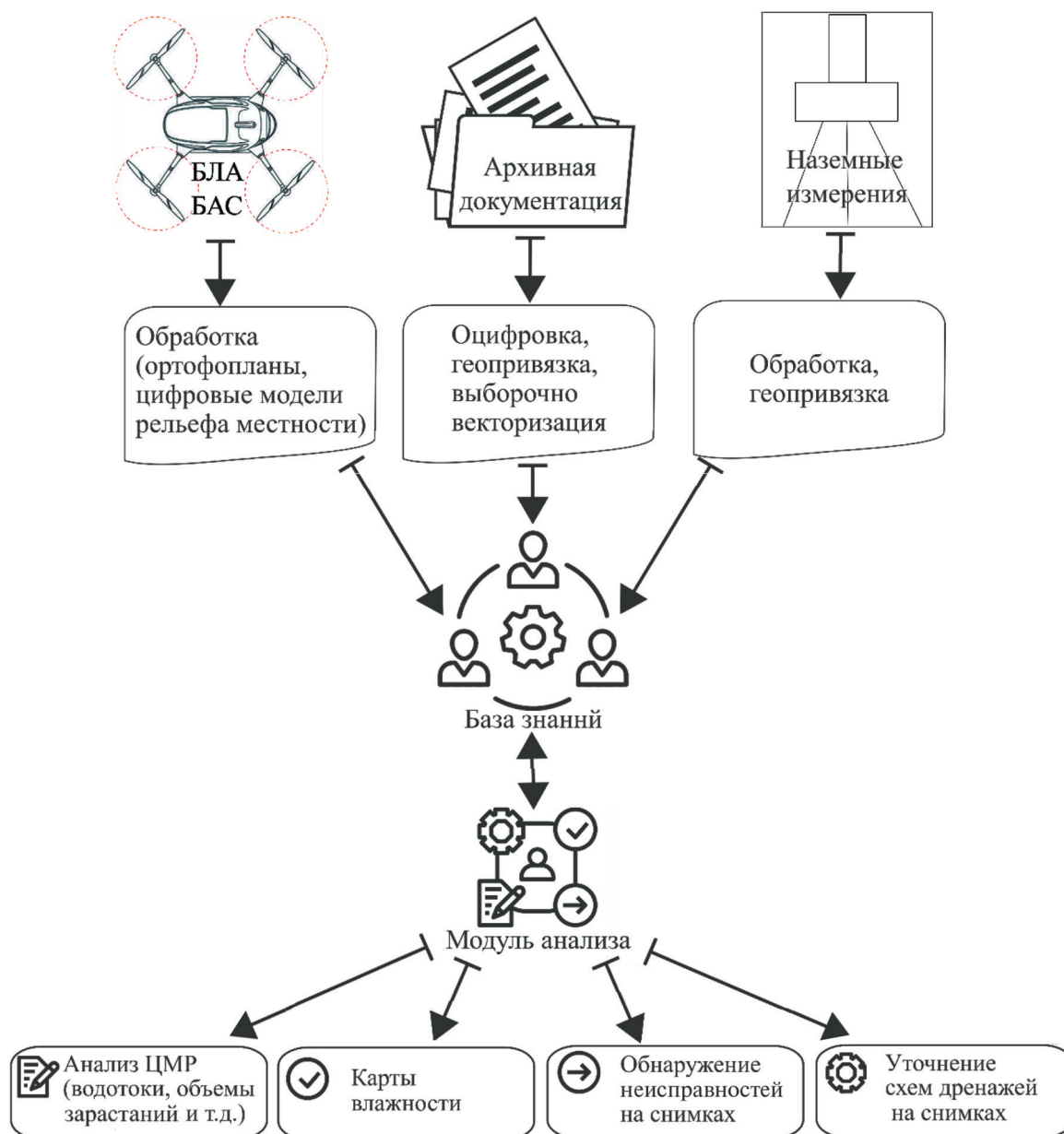


Рис. 6. Общая структура подхода к мониторингу осушительных мелиоративных систем с использованием ДДЗ

На основе собранных и проанализированных данных была разработана структура БЗ для мониторинга осушительных мелиоративных систем с помощью онтологического подхода в программе Protégé 5.5.0. В качестве базовых были определены восемь классов (*рис. 4*, см. с. 167):

- Аэрофотосъёмка (Аеро). Важным разделом информации для мониторинга считаются ДДЗ, которые включают в себя предобработанные мультиспектральные и гиперспектральные снимки.

- Погодные данные (Meteo). Необходимым элементом также становятся метеоусловия. Так, например, в ходе исследований было обнаружено, что более информативными для мониторинга снимки в видимом диапазоне представляются после выпадения осадков либо с началом таяния снега.
- Поле (Field). Обязательный концепт, содержит базовую информацию о полях.
- Осушительные мелиоративные объекты (Drainage objects). Включает в себя основные элементы поверхностных и подземных дренажных систем.
- Неисправности (Defects). Помимо самого перечня неисправностей объектов осушительных комплексов также содержит соответствующие размеченные изображения.
- Наземные измерения (Ground samples). Кроме классических измерений почвенной влажности также необходимы уточнённые цифровые геопривязанные схемы объектов мелиоративных систем (включая неисправные).
- Архивные карты-схемы (Archive maps). При наличии также необходима сверка с имеющимися оцифрованными картами расположения дренажных комплексов.
- Календарь (Date). Многие данные, помимо привязки к географическим координатам, необходимо датировать.

На *рис. 5* (см. с. 167) представлен граф отношений между базовыми концептами, при этом иерархические связи были удалены для наглядности, всего было назначено четыре свойства объектов (все отношения подписаны).

Полученная структура имеет общий вид, её можно имплементировать во множество различных проектов. Кроме того, предложенная БЗ позволяет оперативно вносить архитектурные изменения без нарушения базовой концепции. В ходе дальнейших исследований предложенная БЗ выполнит одну из ключевых ролей. Схематично все элементы и этапы подхода к мониторингу осушительных мелиоративных систем на основе ДДЗ проиллюстрированы на *рис. 6*.

Заключение

В качестве основного результата работы предложена структура базы знаний для мониторинга объектов осушительной мелиорации на основе данных дистанционного зондирования. В ходе проведённых исследований сформированы следующие основные выводы и результаты:

- аэрофотоснимки (в том числе и в видимом диапазоне при съёмке в определённых метеоусловиях) позволяют обнаруживать определённые виды неисправностей, а также в перспективе уточнять схему расположения дренажных систем;
- на основе многолетних полевых экспериментов выделены наиболее распространённые неисправности объектов дренажных систем;
- разработанная структура базы знаний на базе концептуальной модели может быть оперативно имплементирована в веб-проекты и приложения, позволяя при этом вносить архитектурные изменения.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 22-26-20082 при поддержке Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 12.04.2022. № 02/2022.

Литература

1. Блохин Ю.И., Якушев В.В., Блохина С.Ю., Петрушин А.Ф., Митрофанова О.А., Митрофанов Е.П., Двирник А.В. Современные решения для формирования опорной информации с целью повышения точности определения агрофизических свойств почвы по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 164–178. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178>.

2. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2018 году. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. С. 82–84.
3. 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. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104>.
4. Agricultural Water Management for Sustainable Rural Development. Annual Report 2021-22. Intern. Commission on Irrigation and Drainage. New Delhi, India: ICID, 2022. 96 p.
5. Allred B., Martinez L., Fessehazion M. K., Rouse G., Williamson T. N., Wishart D., Koganti T., Freeland R., Eash N., Batschelet A., Featheringill R. Overall results and key findings on the use of UAV visible-color, multispectral, and thermal infrared imagery to map agricultural drainage // Agricultural Water Management. 2020. V. 232. Art. No. 106036. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106036>.
6. Culibrk D., Vukobratovic D., Minic V., Fernandez M. A., Osuna J. A., Crnojevic V. GIS applications for irrigation management // Sensing Technologies for Precision Irrigation, Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering. N.Y., USA: Springer, 2014. P. 69–93. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8329-8_3.
7. Fillion R., Bernier M., Paniconi C., Chokmani K., Melis M., Soddu A., Talazac M., Lafortune F. X. Remote sensing for mapping soil moisture and drainage potential in semi-arid regions: Applications to the Campidano plain of Sardinia, Italy // Science of the Total Environment. 2016. V. 543. Pt. B. P. 862–876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.068>.
8. Haripavan N., Ramalingeshwararao G. V., Abbaiah G., Sai Krishna G. Assessment of soil erosion in Upper Tungabhadra Sub basin by using universal soil loss equation and geospatial techniques // Proc. Intern. Conf. Remote Sensing for Disaster Management / eds. Rao P. J., Rao K. N., Kubo S. Switzerland: Springer Nature, 2019. P. 173–188. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77276-9_17.
9. Karar M. E., Alotaibi F., Rasheed A., Reyad O. A pilot study of smart agricultural irrigation using unmanned aerial vehicles and IoT-based cloud system // Intern. J. Information Sciences Letters. 2021. V. 10. No. 1. P. 131–140. <https://doi.org/10.18576/isl/100115>.
10. King K. W., Williams M. R., Macrae M. L., Fausey N. R., Frankenberger J., Smith D. R., Kleinmann K. A., Brown L. C. Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review // J. Environmental Quality. 2015. V. 44. No. 2. P. 467–485. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.04.0163>.
11. Kratt C. B., Woo D. K., Johnson K. N., Haagsma M., Kumar P., Selker J., Tyler S. Field trials to detect drainage pipe networks using thermal and RGB data from unmanned aircraft // Agricultural Water Management. 2020. V. 229. Art. No. 105895. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105895>.
12. Ngo Q. H., Kechadi T., Le-Khac N.-A. OAK: Ontology-based knowledge map model for digital agriculture // arXiv.org. 2020. 15 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.11442>.
13. Ngo Q. H., Kechadi T., Le-Khac N.-A. Knowledge representation in digital agriculture: A step towards standardised model // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. V. 199. Art. No. 107127. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107127>.
14. Nhamo L., Magidi J., Nyamugama A., Clulow A. D., Sibanda M., Chimonyo V. G. P., Mabhaudhi T. Prospects of improving agricultural and water productivity through unmanned aerial vehicles // Agriculture. 2020. V. 10. P. 256–267. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070256>.
15. Prinds C., Petersen R. J., Greve M. H., Iversen B. V. Locating tile drainage outlets and surface flow in riparian lowlands using thermal infrared and RGB-NIR remote sensing // Geografisk Tidsskrift — Danish J. Geography. 2019. V. 119. No. 1. P. 94–105. <https://doi.org/10.1080/00167223.2019.1573408>.
16. Serrano J., Shahidian S., Silva J. M. Evaluation of normalized difference water index as a tool for monitoring pasture seasonal and inter-annual variability in a Mediterranean agro-silvo-pastoral system // Water. 2019. V. 11. No. 5. P. 62–81. <https://doi.org/10.3390/w11010062>.
17. Singh A. Hydrological problems of water resources in irrigated agriculture: A management perspective // J. Hydrology. 2016. V. 541. P. 1430–1440. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.044>.
18. Singh A. Managing the salinization and drainage problems of irrigated areas through remote sensing and GIS techniques // Ecological Indicators. 2018. V. 89. P. 584–589. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.041>.
19. Skobelev P. O., Simonova E. V., Smirnov S. V., Budaev D. S., Voshchuk G. Y., Morokov A. L. Development of a knowledge base in the “smart farming” system for agricultural enterprise management // Procedia Computer Science. 2019. V. 150. P. 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.029>.
20. Tilahun T., Seyoum W. M. High-resolution mapping of tile drainage in agricultural fields using unmanned aerial system (UAS) — based radiometric thermal and optical sensors // Hydrology. 2021. V. 8. No. 2. Art. No. 8010002. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010002>.
21. Tlapakova L. Agricultural drainage systems in the Czech landscape — Identification and functionality assessment by means of remote sensing // European Countryside. 2017. V. 9(1). P. 77–98. <https://doi.org/10.1515/euco-2017-0005>.

22. Turi N., Rakonczai J., Bozan C. Condition assessment of subsurface drained areas and investigation of their operational efficiency by field inspection and remote sensing methods // J. Environmental Geography. 2021. V. 14. No. 3–4. P. 14–25. <https://doi.org/10.2478/jengeo-2021-0008>.
23. Virnodkar S. S., Pachghare V. K., Patil V. C., Jha S. K. Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review // Precision Agriculture. 2020. V. 21. No. 5. P. 1121–1155. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09711-9>.

Knowledge base for monitoring drainage melioration systems based on remote sensing data

E. P. Mitrofanov^{1,2}, O. A. Mitrofanova^{1,2}, Yu. G. Yanko¹,
A. F. Petrushin¹, V. M. Bure^{1,2}

¹ Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mail: mjeka89@gmail.com

² Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: o.a.mitrofanova@spbu.ru

Drainage melioration systems are important for agricultural areas with waterlogged zones. Open (surface) and closed (subsurface) drainage objects are distinguished. A promising direction for operational state assessment of drainage systems is the use of remote sensing data. A high potential for solving such problems has the use of unmanned aerial vehicles, which can obtain high-quality images of an agricultural area in various imaging spectra in a short time. In this work, as the first stage of solving a large-scale problem of automating image analysis methods for assessing the state of drainage complexes, a specialized knowledge base (KB) of the main drainage defects to be repaired, based on aerial photographs and ground measurements, is proposed. The KB structure developed on the basis of a conceptual model can be quickly implemented in web projects and applications, while allowing architectural changes to be made. Also, on the basis of many years of field experiments, the most common defects of drainage systems objects were identified.

Keywords: knowledge base, ontology, aerial photography, drainage systems, remote sensing data

Accepted: 01.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-163-172

References

1. Blokhin Yu. I., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Petrushin A. F., Mitrofanova O. A., Mitrofanov E. P., Dvirnik A. V., New solutions for the reference data formation to improve the accuracy of the agrophysical soil properties determination from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 164–178 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-164-178>.
2. *Doklad o sostoyanii i ispol'zovanii zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya Rossiiskoi Federatsii v 2018 godu* (Report on the state and use of agricultural land in the Russian Federation in 2018), Moscow: Rosinformagrotech, 2020, pp. 82–84 (in Russian).
3. Dubenok N. N., Yanko Yu. G., Petrushin A. F., Kalinichenko R. V., 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 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-96-104>.
4. *Agricultural Water Management for Sustainable Rural Development, Annual Report 2021-22*, Intern. Commission on Irrigation and Drainage, India, New Delhi: ICID, 2022, 96 p.
5. Allred B., Martinez L., Fessehazion M. K., Rouse G., Williamson T. N., Wishart D., Koganti T., Freeland R., Eash N., Batschelet A., Featheringill R., Overall results and key findings on the use of UAV visible-color,

- multispectral, and thermal infrared imagery to map agricultural drainage, *Agricultural Water Management*, 2020, Vol. 232, Art. No. 106036, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106036>.
6. Culibrk D., Vukobratovic D., Minic V., Fernandez M.A., Osuna J.A., Crnojevic V., GIS applications for irrigation management, *Sensing Technologies for Precision Irrigation, SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering*, N.Y., USA: Springer, 2014, pp. 69–93, https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8329-8_3.
7. Fillion R., Bernier M., Paniconi C., Chokmani K., Melis M., Soddu A., Talazac M., Lafortune F.X., Remote sensing for mapping soil moisture and drainage potential in semi-arid regions: Applications to the Campidano plain of Sardinia, Italy, *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 543, Pt. B, pp. 862–876, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.068>.
8. Haripavan N., Ramalingeshwararao G.V., Abbaiah G., Sai Krishna G., Assessment of soil erosion in Upper Tungabhadra Sub basin by using universal soil loss equation and geospatial techniques. *Proc. Intern. Conf. Remote Sensing for Disaster Management*, Rao P.J., Rao K.N., Kubo S. (eds.), Switzerland: Springer Nature, 2019, pp. 173–188, https://doi.org/10.1007/978-3-319-77276-9_17.
9. Karar M.E., Alotaibi F., Rasheed A., Reyad O., A pilot study of smart agricultural irrigation using unmanned aerial vehicles and IoT-based cloud system, *Intern. J. Information Sciences Letters*, 2021, Vol. 10, No. 1, pp. 131–140, <https://doi.org/10.18576/isl/100115>.
10. King K.W., Williams M.R., Macrae M.L., Fauser N.R., Frankenberger J., Smith D.R., Kleinmann K.A., Brown L.C., Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: A review, *J. Environmental Quality*, 2015, Vol. 44, No. 2, pp. 467–485, <https://doi.org/10.2134/jeq2014.04.0163>.
11. Kratt C.B., Woo D.K., Johnson K.N., Haagsma M., Kumar P., Selker J., Tyler S., Field trials to detect drainage pipe networks using thermal and RGB data from unmanned aircraft, *Agricultural Water Management*, 2020, Vol. 229, Art. No. 105895, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105895>.
12. Ngo Q.H., Kechadi T., Le-Khac N.-A., OAK: Ontology-based knowledge map model for digital agriculture, *arXiv.org*, 2020, 15 p., <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.11442>.
13. Ngo Q.H., Kechadi T., Le-Khac N.-A., Knowledge representation in digital agriculture: A step towards standardised model, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, Vol. 199, Art. No. 107127, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107127>.
14. Nhamo L., Magidi J., Nyamugama A., Clulow A.D., Sibanda M., Chimonyo V.G.P., Mabhaudhi T., Prospects of improving agricultural and water productivity through unmanned aerial vehicles, *Agriculture*, 2020, Vol. 10, pp. 256–267, <https://doi.org/10.3390/agriculture10070256>.
15. Prinds C., Petersen R.J., Greve M.H., Iversen B.V., Locating tile drainage outlets and surface flow in riparian lowlands using thermal infrared and RGB-NIR remote sensing, *Geografisk Tidsskrift — Danish J. Geography*, 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 94–105, <https://doi.org/10.1080/00167223.2019.1573408>.
16. Serrano J., Shahidian S., Silva J.M., Evaluation of normalized difference water index as a tool for monitoring pasture seasonal and inter-annual variability in a Mediterranean agro-silvo-pastoral system, *Water*, 2019, Vol. 11, No. 5, pp. 62–81, <https://doi.org/10.3390/w11010062>.
17. Singh A., Hydrological problems of water resources in irrigated agriculture: A management perspective, *J. Hydrology*, 2016, Vol. 541, pp. 1430–1440, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.044>.
18. Singh A., Managing the salinization and drainage problems of irrigated areas through remote sensing and GIS techniques, *Ecological Indicators*, 2018, Vol. 89, pp. 584–589, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.041>.
19. Skobelev P.O., Simonova E.V., Smirnov S.V., Budaev D.S., Voshchuk G.Y., Morokov A.L., Development of a knowledge base in the “smart farming” system for agricultural enterprise management, *Procedia Computer Science*, 2019, Vol. 150, pp. 154–161, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.02.029>.
20. Tilahun T., Seyoum W.M., High-resolution mapping of tile drainage in agricultural fields using unmanned aerial system (UAS) — based radiometric thermal and optical sensors, *Hydrology*, 2021, Vol. 8, No. 2, Art. No. 8010002, <https://doi.org/10.3390/hydrology8010002>.
21. Tlapakova L., Agricultural drainage systems in the Czech landscape — Identification and functionality assessment by means of remote sensing, *European Countryside*, 2017, Vol. 1, pp. 77–98, <https://doi.org/10.1515/euco-2017-0005>.
22. Turi N., Rakonczai J., Bozan C., Condition assessment of subsurface drained areas and investigation of their operational efficiency by field inspection and remote sensing methods, *J. Environmental Geography*, 2021, Vol. 14, No. 3–4, pp. 14–25, <https://doi.org/10.2478/jengeo-2021-0008>.
23. Virnodkar S.S., Pachghare V.K., Patil V.C., Jha S.K., Remote sensing and machine learning for crop water stress determination in various crops: a critical review, *Precision Agriculture*, 2020, Vol. 1, No. 5, pp. 1121–1155, <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09711-9>.