

АКТУАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕЛИОРАЦИИ И ГИДРОТЕХНИКИ

Научная статья

УДК 626.81.004.65

Применение сетевого анализа данных геометрической сети в базе пространственных данных оросительных систем (на примере Азовской и Понуро-Калининской оросительных систем)

Алексей Николаевич Рыжаков

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация, xrust.89@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9268-255X>

Аннотация. **Цель:** создание геометрических сетей (ГС) и проведение сетевого анализа (СА) на основе пространственных данных оросительных систем (ОС). **Материалы и методы.** Исходными данными для ГС были разработанная ранее геоинформационная база данных и слои в формате *.shp, полученные в результате оцифровки. Использовалось программное обеспечение «ArcGIS DeskTop» версии 10.4.1. СА производился с помощью модуля Network Analyst. **Результаты.** Созданы две файловые базы данных с геометрическими сетями пространственных объектов Азовской ОС (магистральный канал и межхозяйственная распределительная сеть) и Понуро-Калининской ОС (распределительная и коллекторно-дренажная сеть). На их основе был проведен СА, то есть определение набора элементов сети в соответствии с заданными условиями. Результатом стало создание выборки для дальнейшей обработки и анализа полученных наборов сведений. Были рассмотрены варианты проведения СА на конкретных примерах. Одной из наиболее распространенных задач СА является поиск всех элементов сети исходя из направления течения. Комбинация флагов и барьеров (функций СА) на ГС, а также визуализация результатов выборки по заданным параметрам позволяют создавать сложные и составные выборки, исходя из специфических для мелиорации задач. **Выводы.** Использование СА может быть эффективным для решения различных задач в мелиорации при оценке количественных характеристик объектов ОС и для установления взаимосвязей между сооружениями, что в свою очередь может стать основой для расчета показателей значимости сооружений в целях определения порядка очередности при планировании реконструкции объектов ОС. Но для создания корректных ГС исходные данные должны соответствовать определенной структуре данных, главным свойством которых является связность этих объектов. В связи с этим созданным ранее слоям ГИС может потребоваться существенная корректировка.

Ключевые слова: реконструкция мелиоративных систем, очередность проведения работ, ГИС, географические сети, геометрические сети, сетевой анализ

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные научные исследования в области мелиорации и гидротехники» (г. Новочеркасск, 30 мая 2025 г.).

Для цитирования: Рыжаков А. Н. Применение сетевого анализа данных геометрической сети в базе пространственных данных оросительных систем (на примере Азовской и Понуро-Калининской оросительных систем) // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 96, № 2. С. 64–82.

CURRENT SCIENTIFIC RESEARCH IN THE FIELD OF LAND RECLAMATION AND HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

The use of network analysis of geometric network data in the spatial database of irrigation systems (using the example of the Azov and Ponuro-Kalinin irrigation systems)

Alexey N. Ryzhakov

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation, xrust.89@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9268-255X>

Abstract. Purpose: to create geometric networks (GN) and carry out network analysis (NA) based on spatial data of irrigation systems (IS). **Materials and methods.** The initial data for GN were previously developed geoinformation database and layers in *.shp format obtained as a result of digitization. ArcGIS Desktop software version 10.4.1 was used. NA was performed using the Network Analyst module. **Results.** Two file databases with geometric networks of spatial objects of the Azov IS (main canal and inter-farm distribution network) and the Ponuro-Kalinin IS (distribution and collector and drainage network) were created. NA was performed on their basis, that is, a set of network elements was determined in accordance with the specified conditions. The result was the creation of a sample for further processing and analysis of the obtained data sets. Options for conducting NA were considered using specific examples. One of the most common tasks of NA is to search for all network elements based on the flow direction. The combination of flags and barriers (NA functions) on the GS, as well as visualization of the results of the selection by the specified parameters, allow creating complex and composite selections based on the tasks specific to melioration. **Conclusions.** The use of NA can be effective for solving various problems in reclamation when assessing the quantitative characteristics of the IS objects and for establishing the relationships between structures, which in turn can become the basis for calculating the indicators of the significance of structures in order to determine the order of priority when planning the IS objects. But to create the correct GS, the initial data must correspond to a certain data structure, the main property of which is the connectivity of these objects. In this regard, previously created GIS layers may require significant adjustment.

Keywords: reconstruction of reclamation systems, sequence of work, GIS, geographic networks, geometric networks, network analysis

Evaluation of the research results: the fundamental principles of the article were reported at the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists “Current Scientific Research in the Field of Land Reclamation and Hydraulic Engineering” (Novocherkassk, May 30, 2025).

For citation: Ryzhakov A. N. The use of network analysis of geometric network data in the spatial database of irrigation systems (using the example of the Azov and Ponuro-Kalinin irrigation systems). *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025; 96(2):64–82. (In Russ.).

Введение. Наряду с дефицитом водных ресурсов, одной из причин невозможности значительно увеличить продуктивность сельскохозяйственного растениеводства является техническое состояние мелиоративных систем (МС). В нашей стране строительство мелиоративной инфраструктуры в основном было завершено в восьмидесятые годы прошлого века. К насто-

ящему времени, по данным ФГБНУ «Росинформагротех» [1], износ сооружений в среднем уже достиг 70 %, а в Южном Федеральном округе этот показатель признан одним из наиболее высоких – 73 %. Более 50 % орошаемых и 95 % осушаемых земель требуют проведения реконструкции и ремонта используемых МС.

Затраты на реконструкцию мелиоративных систем являются очень внушительны, поэтому актуальным остается вопрос планирования очередности проведения работ внутри каждой МС. В последние годы было предложено множество методик выбора очередности. Например, предлагалось планировать ремонтные работы элементов МС исходя из значимости каждого сооружения при формировании водного режима и урожайности, т. е. очередность должна быть такой, чтобы каждый этап реконструкции обеспечивал максимальное повышение надежности всей МС по сравнению с последующими этапами [2]. При другом подходе следовало учитывать затраты на «компенсирующие» мощности, то есть инвестиций на создание дополнительных мощностей, необходимых для производства недостающих объемов продукции [3–4]. Еще один способ был основан на расчете показателя значимости элементов МС, базирующегося на построении ее структурной иерархической схемы и на оценке технического состояния каждого из элементов [5].

Независимо от выбранной методики выбор очередности объектов или отдельных компонентов МС на реконструкцию должен происходить на основании сбора данных об этих объектах и на объемах мероприятий, проводимых в хозяйстве [6]. Согласно ГОСТ Р 71110-2023¹ производить сбор, хранение и анализ многофакторных исходных данных рекомендуется с использованием информационных систем, что предполагает, в первую очередь, использование геоинформационных систем [7]. Изменения в гос-

¹ГОСТ Р 71110-2023. Системы и сооружения мелиоративные. Реконструкция. Общие требования. Введ. 2023-11-23. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. 16 с.

ударственных нормативных документах последних лет [8] четко следуют тренду в вопросах создания информационных моделей существующих объектов капитального строительства, в том числе гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений.

Эффективное использование накопленной информации в ГИС подразумевает не только наличие в собираемых сведениях пространственной и географической составляющей [9], но и взаимосвязь всех элементов накапливаемых данных.

Сбор данных для ГИС чаще всего представляет собой обычную оцифровку бумажных карт, схем и экспликаций, нанесение на цифровую карту сооружений (каналов, водовыпусков, точек водозабора и др.) и полей, а также прикрепление к указанным векторным объектам дополнительных документов, электронных таблиц, фотографий и подложек (ортофотопланов, космических снимков, растров поверхностей по данным ДЗЗ). Но когда речь заходит об анализе всех этих сведений, обычно подразумевается лишь представление всех этих объектов на цифровой карте и выполнение простых выборок внутри каждой группы объектов (точки, линии, полигоны) по расположению (например, поиск внутри района или близость к населенному пункту) или по атрибуту (по заданному параметру, например, по указанной в атрибутивной таблице принадлежности к той или иной ОС). В то же время помимо базовых инструментов накопления и визуализации данных, в современных ГИС имеется множество технологий и средств для преобразования и синтеза различных сведений, в том числе для задач управления [10]. Однако данными инструментами в большинстве случаев никто не пользуется не только из-за отсутствия навыков использования специализированного ПО, но и потому, что внесенные в геоинформационные базы данных (ГИБД) данные обычно не бывают должным образом оцифрованы и размечены.

Существует и другая проблема. Избыточность вносимых в ГИБД данных приводит к дублированию той или иной информации, усложняет систему и искажает итоговые результаты. Очень важным является вопрос выбора оптимального набора исходной информации, вносимой в ГИС и необходимой для достижения поставленных целей и принятия управленческих решений. Если говорить о моделировании процессов водораспределения на оросительных системах, то основой здесь является имитация процессов движения воды в каналах, а также работы регулирующих гидротехнических сооружений или, например, особенностей водопользования.

Мелиоративные системы, наряду с другими инженерными сетями, такими, как транспортные, электрические, газопроводные, водопроводные и прочие сети коммуникаций, являются географическими сетями. В ГИС это значит, что они имеют следующие свойства: наличие модели сети, ее геометрического представления с размерными привязками и координатами, атрибутивного описания технических параметров элементов сети и ее элементов. Представление мелиоративной сети в виде модели позволяет анализировать ее методами теории графов, где ребрами являются каналы, дрены и трубопроводы, а соединениями (вершинами) – перегораживающие сооружения и водовыпуски или другие объекты.

Географические сети в ГИС представлены двумя основными классами – транспортными и геометрическими. Однако если транспортная сеть является двунаправленной, то геометрическая имеет лишь определенное направление – вниз по течению. К ним можно отнести реки, трубопроводы, каналы.

Стандартные инструменты любого ПО ГИС способны проводить анализ геометрических сетей и извлекать качественно новую информацию о ней [11]. В основном сетевой анализ применяется для анализа транспортных сетей [12], в том числе для инфраструктуры орошаемых полей [13], но такие возможности моделирования и визуализации могут быть весьма эффек-

тивны и при планировании реконструкции оросительных систем и проработке вопросов очередности восстановительных и ремонтных работ.

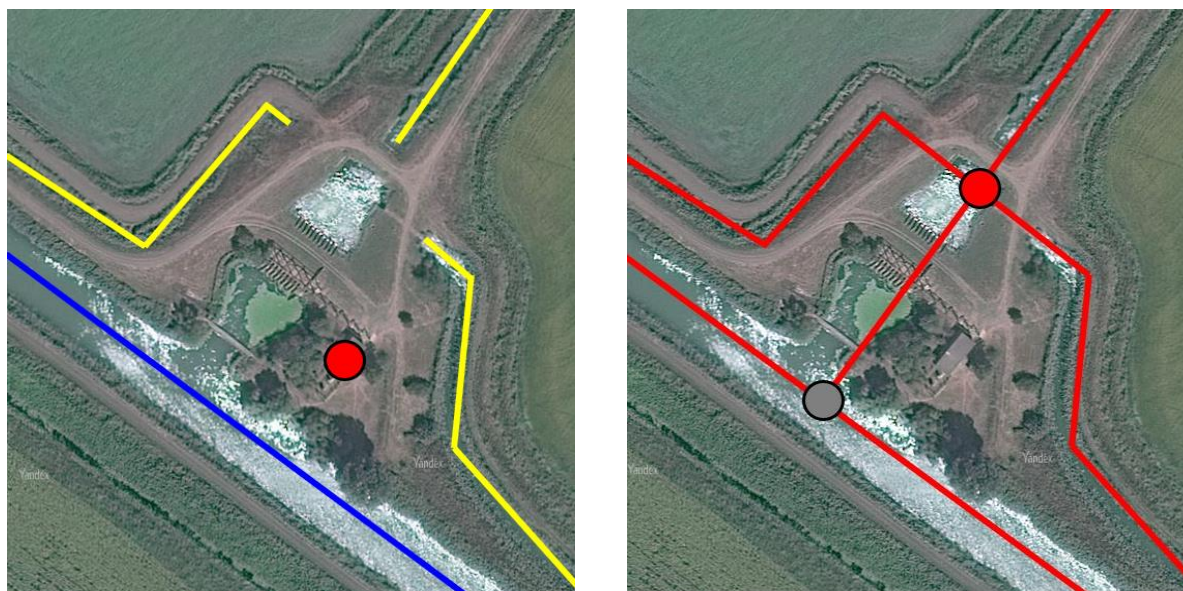
Если геометрическая сеть смоделирована должным образом, то появляется возможность проводить различные типы сетевого анализа с помощью группы инструментов для создания, управления и запуска задач трассировки в геометрических сетях. Такой подход позволяет выполнить следующие основные задачи: установить направление потока на основе направления оцифровки или установки источника (приемника) в геометрической сети; произвести проверку и восстановление связности геометрической сети, то есть выявить и исправить различные проблемы связности и ошибки геометрии сети; осуществить трассировку согласно запросу, заданному с помощью флагов и барьеров. Флагом является инструмент выбора вершины сети, в отношении которой производится анализ (трассировка или выборка), а барьерами называются устанавливаемые препятствия для перемещения по ребрам.

В данной работе представлены результаты создания геометрических сетей и проведения сетевого анализа на основе пространственных данных мелиоративных сетей.

Материалы и методы. В качестве основы для создания геометрических сетей были использованы пространственные данные разработанной ранее геоинформационной базы данных «Понуро-Калининская «Водохозяйственная система» [14] и слои в формате *.shp, полученные в результате оцифровки объектов Азовской оросительной системы. Геометрические сети были созданы в программном обеспечении «ArcGIS DeskTop» версии 10.4.1. Сетевой анализ производился с помощью модуля Network Analyst.

Для формирования функционирующей геометрической сети ранее созданные слои были откорректированы таким образом, чтобы линейные и точечные объекты были неразрывны друг с другом, то есть соприкасающиеся объекты были притянуты друг к другу (снэппинг), осевые линии ос-

новых водотоков были разделены в местах соединений, а также были определены дополнительные точечные объекты для задания истока и устья. Пример корректировки пространственных данных представлен на рисунке 1.



а) исходные векторные объекты

a) original vector objects

б) исправленные объекты

b) adjusted objects

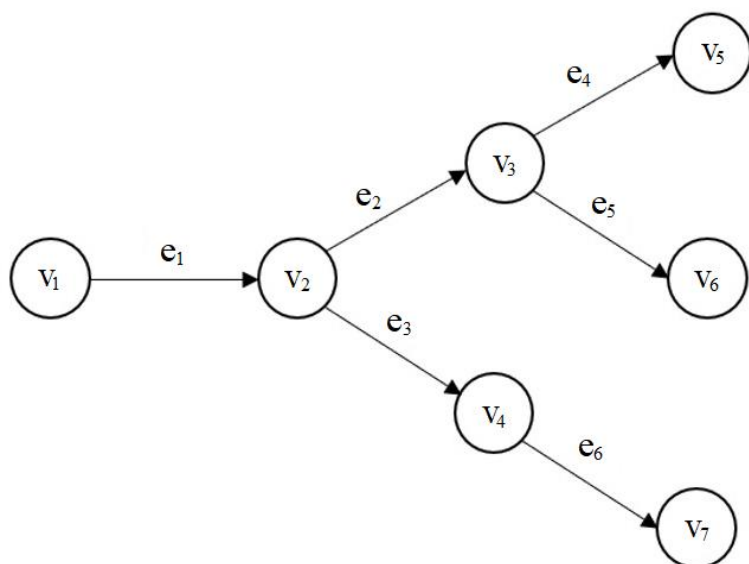
Условные обозначения: — магистральный канал; — распределительная сеть;
 • — насосная станция; — каналы (ребра графа); • — промежуточное соединение графа
 Conventional symbols: — main channel; — distribution network;
 • — pumping station; — channels (graph edges); • — intermediate graph connection

Рисунок 1 – Пример корректировки исходных векторных объектов для создания геометрической сети

Figure 1 – Example of adjusting the original vector objects for creating a geometric network

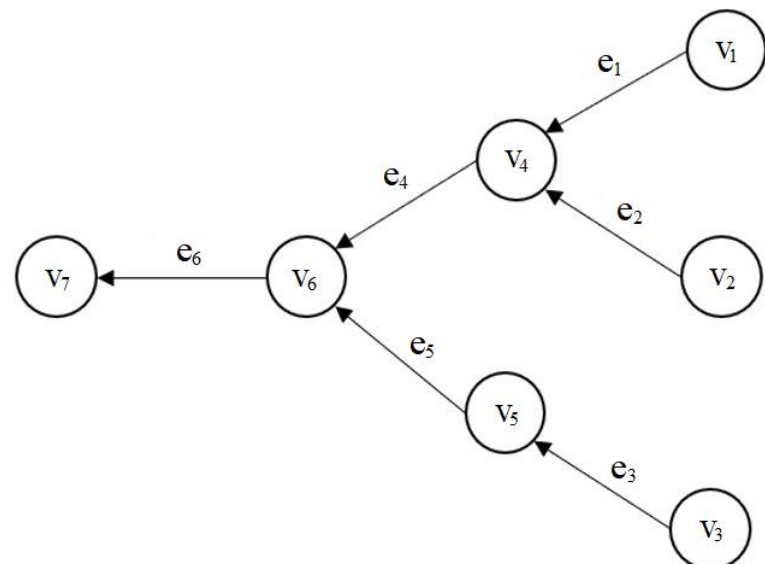
Основой для создания геометрической сети являются в первую очередь линейные объекты. Слой вершин был сформирован при непосредственном создании сети, а импорт атрибутивных сведений был произведен из исходного точечного слоя с сооружениями из ГИБД.

Исходя из теории графов, сформированной в ГИС сетевой модели соответствует произвольный граф. Так как все ребра и вершины в геометрической сети различны, то граф является простой цепью (рисунок 2).



a) v_1 – источник для распределительной сети

a) v_1 – source for the distribution network



b) v_7 – устье для коллекторно-дренажной сети

b) v_7 – mouth for the collector-drainage network

Условные обозначения: ($v_1, v_2, \dots, v_7$) – вершина графа; ($e_1, e_2, \dots, e_7$) – ребро графа

Conventional symbols: ($v_1, v_2, \dots, v_7$) – graph vertex; ($e_1, e_2, \dots, e_7$) – graph edge

**Рисунок 2 – Схема построения графа в виде простой цепи,
 исходя из установки роли точки стока**

**Figure 2 – Scheme of constructing a graph in the form of a simple
 chain, based on the installation of the drain point role**

Результаты. В результате работы в рамках данного исследования были созданы две файловые базы данных с геометрическими сетями ранее оцифрованных пространственных объектов оросительных сетей. Геометрическая сеть Азовской оросительной системы представляет собой магистральный канал протяженностью 92,2 км с сооружениями на нем, а также каналы, лотковые и закрытые трубопроводы, образующие межхозяйственную распределительную сеть, расположенную в четырех административных районах Ростовской области, с точкой истока в водозаборном сооружении НС-42 [15]. Геометрическая сеть Понуро-Калининской оросительной системы (ПКОС) состоит из двух наборов связанных ребер и узлов, составляющих распределительную (исток – головное сооружение МПК) и коллекторно-дренажную сеть (устье – в точке впадения магистрального опреснительного канала (МОК) в Джерелиевский главный коллектор).

Основной целью создания вышеприведенных геометрических сетей являлось проведение на их основе сетевого анализа, то есть определения набора элементов сети в соответствии с заданными условиями. Результатом сетевого анализа в нашем случае было создание выборки для дальнейшей обработки и анализа полученных наборов сведений. Рассмотрим примеры проведения сетевого анализа на конкретных примерах.

Одной из наиболее распространенных задач сетевого анализа является поиск всех элементов сети исходя из направления течения, то есть вверх или вниз по течению. Необходимо отметить, что здесь результат зависит от начальных условий построения сети, то есть указан в ней исток или устье.

Пример 1 – трассировка вверх по течению: выявление элементов распределительной сети ПКОС, которые лежат выше указанной точки по течению. В качестве точки, относительно которой производилась трассировка, была выбрана насосная станция № 6. В результате получаем следующее. Чтобы вода была доставлена к указанной НС, ей необходимо пройти от головного водозабора по следующим сооружениям: по всему участку маги-

стрального канала МПК ПК 0-ПК 254, частично по участку МПК ПК 254-ПК 648 и по расположенным на нем гидроузлам ГТУ № 13 (ПК 258+87) и № 26 (ПК 415+31). Результат данной трассировки представлен на рисунке 3.

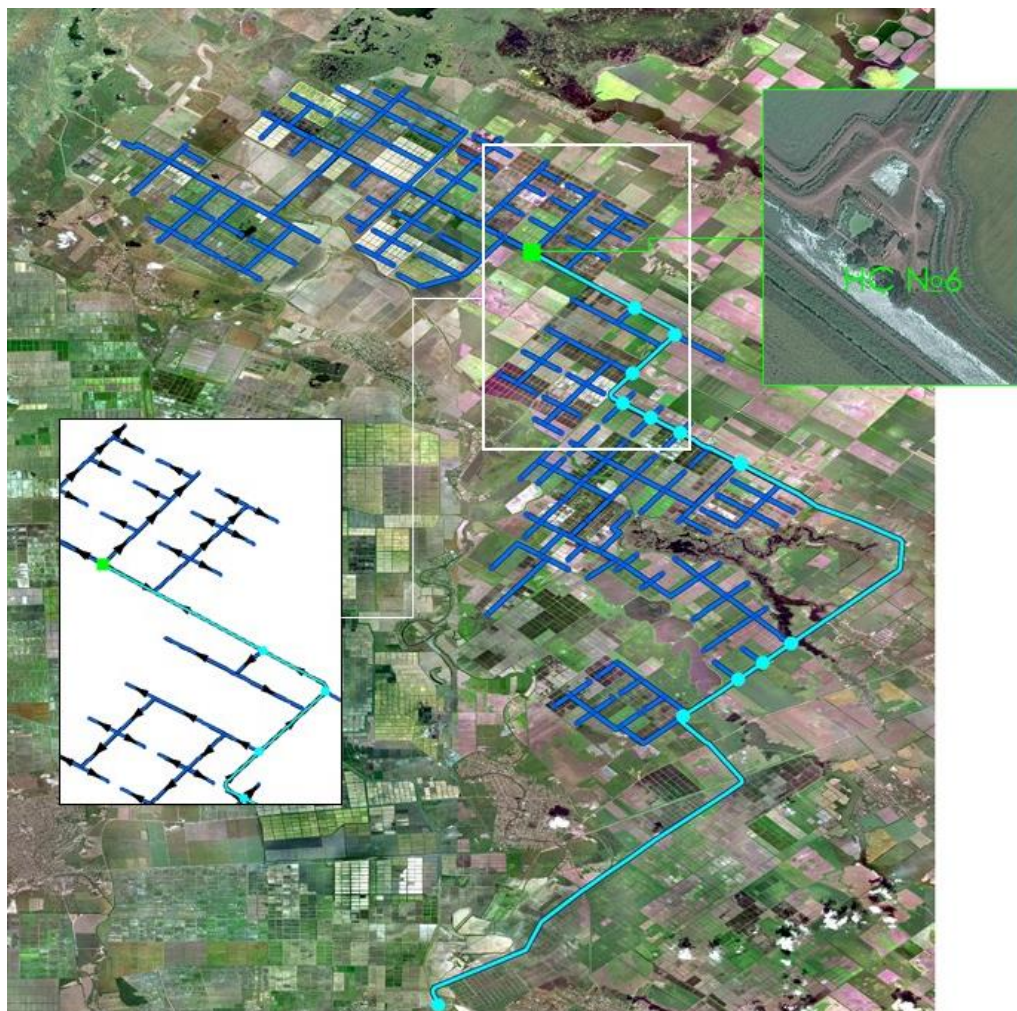


Рисунок 3 – Выявление элементов распределительной сети ПКОС, которые лежат выше указанной точки по течению (пример 1)

Figure 3 – Identification of the Ponuro-Kalinin IS distribution network elements, which lie upstream of the specified point (example 1)

Пример 2 – трассировка вверх по течению: выявление элементов коллекторно-дренажной сети ПКОС, которые лежат выше указанной точки по течению. В качестве точки, относительно которой производилась трассировка, была указана точка на участке межхозяйственного осушительного канала в месте впадения дренажного канала К-8. Результаты трассировки представлены на рисунке 4.

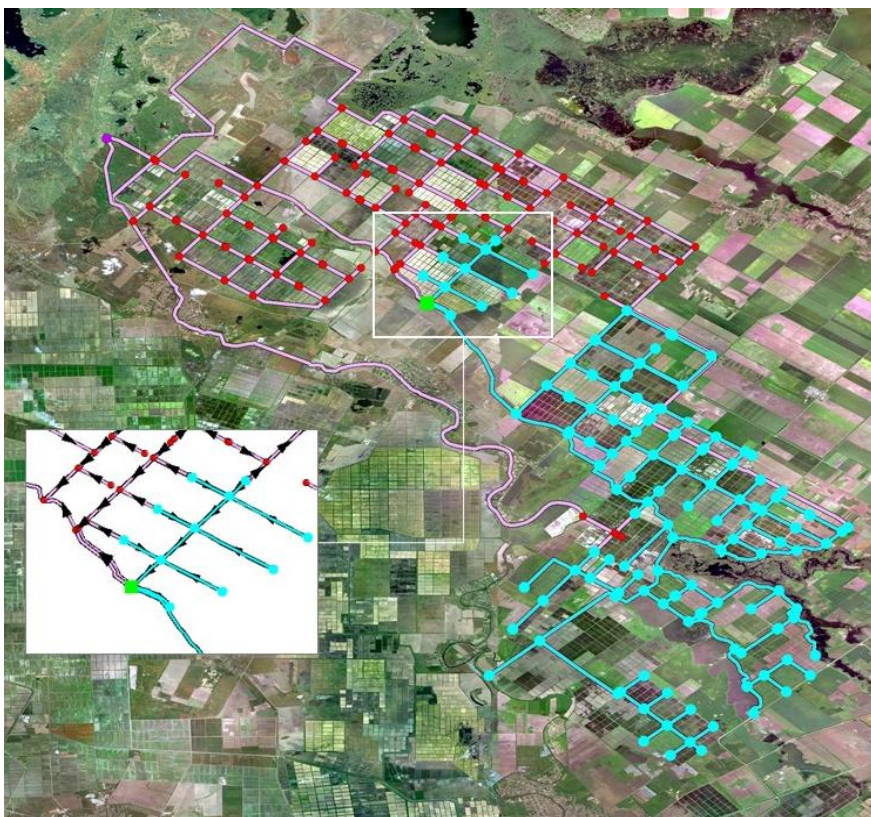


Рисунок 4 – Выявление элементов коллекторно-дренажной сети ПКОС, которые лежат выше указанной точки по течению (пример 2)

Figure 4 – Identification of the Ponuro-Kalinin IS collector-drainage network elements, which lie upstream of the specified point (example 2)

Получив в результате трассировки определенную выборку объектов, инструментами ГИС можно без использования дополнительных модулей и стороннего ПО произвести визуализацию полученных данных согласно имеющимся атрибутам.

Пример 3 – трассировка вниз по течению: выявление элементов распределительной сети ПКОС, которые лежат ниже указанной точки по течению. В качестве точки, относительно которой была произведена трассировка, выбрано перегораживающее сооружение на МПК (ПК 606+54). По результатам выборки был сделан следующий запрос: получить протяженность сооружений межхозяйственной и внутрихозяйственной сетей. В итоге были получены следующие сведения: совокупная длина межхозяйственных каналов, включая участок МПК, составила 25,6 км, внутрихозяйственных распределителей – 53,7 км.

Пример 4 – трассировка вниз по течению: выявление элементов межхозяйственной сети Азовской ОС, которые лежат ниже указанной точки по течению. В качестве точки, относительно которой была произведена трассировка, выбран выходной оголовок Дюкера № 1 (ПК 138+73). По результатам выборки делаем следующий запрос: получить протяженности линейных сооружений по филиалам ФГБУ «Ростовмелиоводхоз» (рисунок 5). В итоге получаем, что по Веселовскому филиалу значение протяженности каналов составляет 15,6 км, по Багаевскому – 94 км, а по Аксайскому – 75,2 км.

Другие инструменты сетевого анализа также можно использовать на рассматриваемых нами геометрических сетях, но в силу специфики водохозяйственных сетей, получаемые с их помощью результаты могут быть не столь информативны.

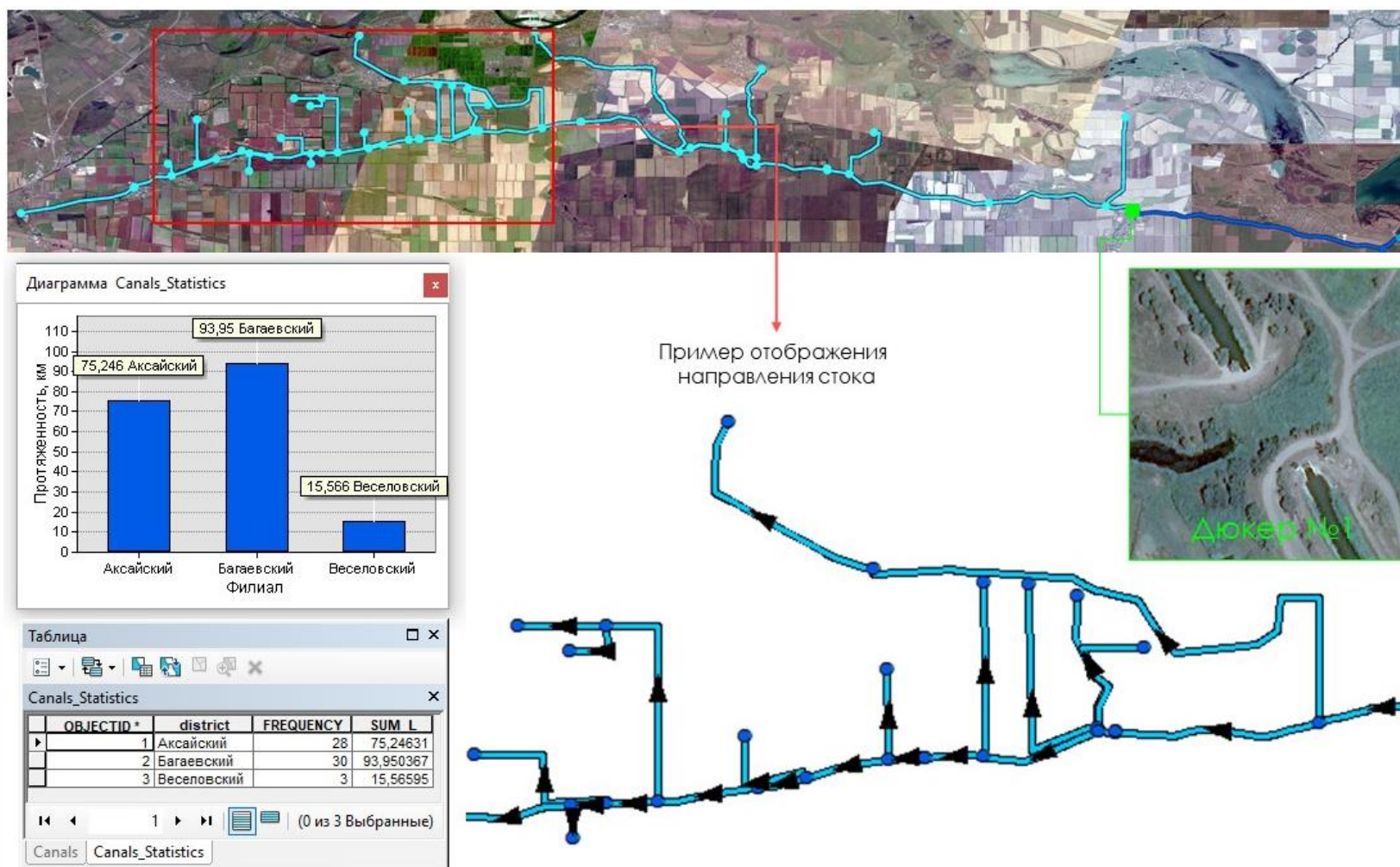


Рисунок 5 – Выявление элементов межхозяйственной сети Азовской ОС, которые лежат ниже указанной точки по течению (пример 4)

Figure 5 – Identification of the Azov IS inter-farm network elements, that lie downstream of the specified point (example 4)

Например, инструмент поиска пути между указанными точками можно применять для поиска возможных маршрутов между интересующими сооружениями во время рекогносцировочного обследования. Инструмент «Поиск предшественников» возможно, к примеру, использовать для выявления общих объектов, то есть каналов межхозяйственной сети, по которым осуществляется доставка воды в различные части ОС для указанных точек. Другие же инструменты, такие, как «Найти петли», и вовсе не дадут никакого результата.

Однако, несмотря на довольно скудный набор возможностей применения инструментов сетевого анализа, комбинированное расположение флагов и барьеров на геометрической сети, а также визуализация результатов выборки по заданным параметрам способны быть отличным подспорьем для моделирования процессов и синтеза необходимой информации. В качестве примера рассмотрим следующий сценарий. Представим, что необходимо определить количество водовыпусков и протяженность каналов, обслуживающих заданные хозяйства в определенной части ПКОС. В качестве основного инструмента сетевого анализа используем трассировку вниз по течению, а для детализации поставленной задачи на геометрической сети установим так называемые «барьеры», чтобы исключить из итогов не интересующие нас области ОС. Согласно поставленной задаче точка, относительно которой необходимо произвести трассировку, расположена на гидроузле № 26 на МПК ПК 415+31. Так как нас, например, интересуют только хозяйства № 1 и 3, на водовыпусках, ведущих на территорию хозяйств № 2 и 4, были установлены барьеры. Результаты по приведенному примеру представлены на рисунке 6. В итоге было определено, что суммарное количество водовыпусков составило 61 сооружение, а совокупная длина каналов – 149,8 км.

Таким образом, имеющийся набор инструментов ПО ArcMap позволяет создавать сложные и составные выборки, исходя из поставленных специфических для мелиорации задач.

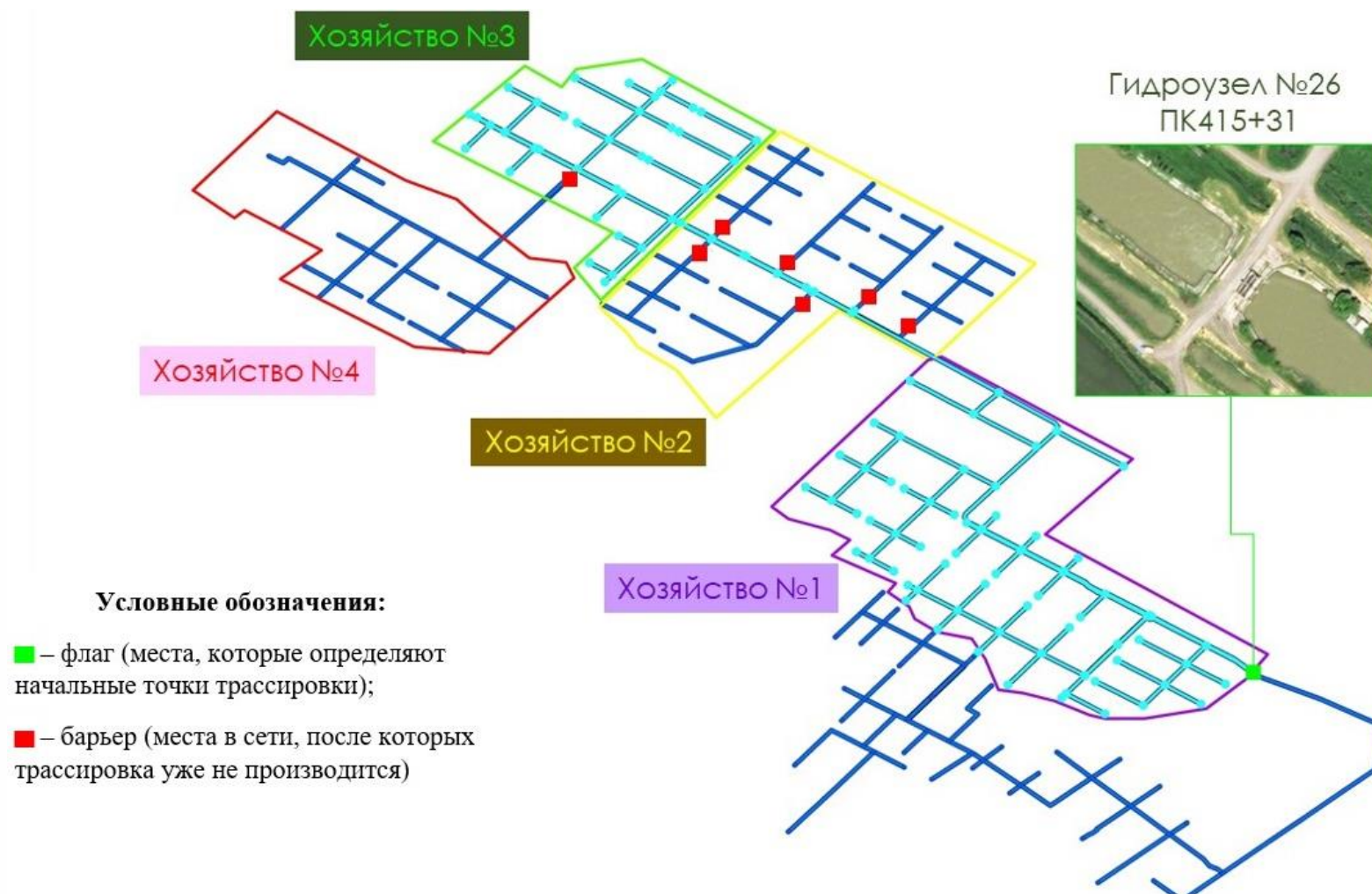


Рисунок 6 – Выявление элементов распределительной сети ПКОС, которые лежат ниже указанной точки по течению (пример 4)
Figure 6 – Identification of the Ponuro-Kalinin IS distribution network elements, which lie downstream of the specified point (example 4)

Выводы. Представленные в исследовании примеры показывают, что использование сетевого анализа может быть довольно эффективным и для решения различных задач в мелиорации при оценке количественных характеристик объектов оросительных сетей и для установления взаимосвязей между сооружениями. Определение количества сооружений и их совокупных характеристик (протяженность), создание выборок по заданным параметрам и выявление связи объектов геометрических сетей (точек и линий) по атрибутивным данным с полигональными объектами (поля, хозяйства) могут в свою очередь стать основой для расчета показателей значимости элементов МС в целях определения порядка очередности при планировании реконструкции объектов оросительных систем.

Однако, несмотря на открывающиеся возможности использования сетевого анализа при работе с пространственными объектами мелиоративных сетей, создание геометрических сетей на их основе может быть связано и с рядом трудностей. Для создания корректных наборов связанных ребер и узлов требуется соответствовать определенной структуре данных, главным свойством которых является связность этих объектов. В связи с этим созданным ранее объектам ГИБД может потребоваться существенная корректировка (снэппинг, разделение осевых линий водотоков в местах соединений, определение истока или устья). Следует также избегать чрезмерной детализации геометрических характеристик – большое количество ребер и соединений могут повлечь за собой как замедление проводимых расчетов, так и формирование лишних, не несущих никакой нужной информации результатов (большое количество промежуточных объектов, не соответствующих реальным сооружениям).

Список источников

1. Развитие мелиоративного комплекса: строительство, модернизация и техническое перевооружение: справ. изд. М.: Росинформагротех, 2021. 88 с.
2. Лукьянова Е. А. Планирование очередности ремонта элементов мелиоративных систем по надежности их функционирования // Мелиорация. 2005. № 2(54). С. 77–81. EDN: WHJWL.

3. Власов М. В., Куприянова С. В. Комплексный подход к определению эффективности реконструкции оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2019. № 2(34). С. 185–200. DOI: 10.31774/2222-1816-2019-2-185-200. EDN: ZIFKTJ.

4. Экономическое обоснование выбора очередности реконструкции оросительных систем с учетом устройства и освоения компенсирующего участка: свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2018617698 / Щедрин В. Н., Васильев С. М., Власов М. В., Куприянова С. В.; правообладатель Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. Заявка № 2018617698; заявл. 29.05.18; опубл. 28.06.18, Бюл. № 7.

5. Кузьмичев А. А. Обоснование приоритетности и очередности проведения ремонтно-восстановительных работ на мелиоративных системах на примере канала Бг-Р-8-1 Багаевской оросительной системы // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 4. С. 231–242. DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-231-242. EDN: EDIFUL.

6. Рекомендации по реконструкции и модернизации мелиоративных систем (на примере Ростовской области) / А. А. Чураев, Ю. Ф. Снопич, Т. А. Погоров [и др.]. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. 30 с. EDN: UBVMUI.

7. Слабунов В. В., Кожанов А. Л. Нормативно-правовое обеспечение реконструкции гидромелиоративных объектов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2023. № 2(90). С. 41–50. EDN: IZIEQM.

8. Зверьков М. С., Брыль С. В. Нормативные и методические аспекты и пример создания цифрового двойника гидромелиоративной системы с использованием данных дистанционного мониторинга // International agricultural journal. 2022. № 3. Р. 1320–1334. DOI: 10.55186/25876740_2022_6_3_24. EDN: RDDMZW.

9. Баженов В. И. Анализ BIM-моделирования инженерных сетей водопроводно-канализационного хозяйства // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 2(140). С. 8–18. EDN: ZUDBYR.

10. Пашковская О. В., Бренинг Д. В. Методы анализа данных в геоинформационных системах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Дню космонавтики, г. Красноярск, 13–17 апр. 2020 г. В 3 т. Т. 2. Красноярск: Сиб. гос. ун-т науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2020. С. 363–365. EDN: HTSCIG.

11. Карпачевский А. М., Новаковский Б. А. Возможности использования инструментов ГИС-пакета ArcGIS для структурного анализа электрических сетей // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 4–11. EDN: CTZDHU.

12. Network Analysis of Road Traffic Crash and Rescue Operations in Federal Capital City / M. S. Jibril, D. S. Aule, B. D. Garba, T. O. Adewuyi // International Journal of Geosciences. 2023. Vol. 14, № 01. Р. 36–51. DOI: 10.4236/ijg.2023.141003. EDN: LCEFRK.

13. Васильченко А. А. Пространственный анализ инфраструктуры орошаемых полей Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области // Научно-агрономический журнал. 2022. № 4(119). С. 12–18. DOI: 10.34736/FNC.2022.119.4.002.12-18. EDN: SATKNY.

14. Рыжаков А. Н., Кузьмичев А. А., Мартынов Д. В. Разработка геоинформационной базы данных «Понуро-Калининская «Водохозяйственная система» // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2023. № 3(91). С. 238–249. EDN: YNZVUX.

15. Оросительные системы: от поколения к поколению: монография. В 2 ч. Ч. 1 / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов, С. М. Васильев, А. А. Чураев. Новочеркасск: Геликон, 2013. 283 с. ISBN 5-93542-042-2. EDN: TRAHID.

References

1. *Razvitie meliorativnogo kompleksa: stroitel'stvo, modernizatsiya i tekhnicheskoe perevooruzhenie: sprav. izd.* [Development of the Reclamation Complex: Construction, Modernization and Engineering Re-Equipment: reference ed.]. Moscow, Rosinformagrotech Publ., 2021, 88 p. (In Russian).
2. Lukyanova E.A., 2005. *Planirovanie ocherednosti remonta elementov meliorativnykh sistem po nadezhnosti ikh funktsionirovaniya* [Planning of repair sequence for elements of reclamation systems on the basis of their reliability]. *Melioratsiya* [Land Reclamation], no. 2(54), pp. 77-81, EDN: WHJIWL. (In Russian).
3. Vlasov M.V., Kupriyanova S.V., 2019. *Kompleksnyy podkhod k opredeleniyu effektivnosti rekonstruktsii orositel'nykh sistem* [Integrated approach for determining the efficiency of irrigation systems reconstruction]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of the Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 2(34), pp. 185-200, DOI: 10.31774/2222-1816-2019-2-185-200, EDN: ZIFKTJ. (In Russian).
4. Shchedrin V.N., Vasiliev S.M., Vlasov M.V., Kupriyanova S.V., 2018. *Ekonomicheskoe obosnovanie vybora ocherednosti rekonstruktsii orositel'nykh sistem s uchetom ustroystva i osvoeniya kompensiruyushchego uchastka: svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM* [Economic justification for choosing the order of reconstruction of irrigation systems taking into account the device and development of the compensating section]. Certificate of State Registration of the Computer Program, no. 2018617698. (In Russian).
5. Kuzmichev A.A., 2024. *Obosnovanie prioritetnosti i ocherednosti provedeniya remontno-vosstanovitel'nykh rabot na meliorativnykh sistemakh na primere kanala Bg-R-8-1 Bagaevskoy orositel'noy sistemy* [Justification of the priority and order of maintenance work on reclamation systems using the example of the BG-R-8-1 channel of the Bagaevskaya irrigation system.]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 14, no. 4, pp. 231-242, DOI: 10.31774/2712-9357-2024-14-4-231-242, EDN: EDIFUL. (In Russian).
6. Churaev A.A., Snipich Yu.F., Pogorov T.A. [et al.], 2015. *Rekomendatsii po rekonstruktsii i modernizatsii meliorativnykh sistem (na primere Rostovskoy oblasti)* [Recommendations for Reconstruction and Modernization of Reclamation Systems (on the example of Rostov region)]. Novocherkassk, RosNIIPM, 30 p., EDN: UBBMUI. (In Russian).
7. Slabunov V.V., Kozhanov A.L., 2023. *Normativno-pravovoe obespechenie rekonstruktsii gidromeliorativnykh ob"ektov* [Regulatory support for the reconstruction of reclamation facilities]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(90), pp. 41-50, EDN: IZIEQM. (In Russian).
8. Zverkov M.S., Bryl S.V., 2022. *Normativnye i metodicheskie aspekty i primer sozdaniya tsifrovogo dvoynika gidromeliorativnoy sistemy s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo monitoringa* [Normative and methodological aspects and an example of creation of the irrigation and drainage system's digital twin using data of the earth remote sensing]. *International Agricultural Journal*, no. 3, pp. 1320-1334, DOI: 10.55186/25876740_2022_6_3_24, EDN: RDDMZW. (In Russian).
9. Bazhenov V.I., 2023. *Analiz BIM-modelirovaniya inzhenernykh setey vodoprovodno-kanalizatsionnogo khozyaystva* [BIM Modeling analysis for the engineering networks of water supply and sewerage industry]. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Development Paths], no. 2(140), pp. 8-18, EDN: ZUDBYR. (In Russian).
10. Pashkovskaya O.V., Brening D.V., 2020. *Metody analiza dannykh v geoinformatsionnykh sistemakh* [Data analysis methods in geoinformation systems]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики: sb. materialov VI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoy Dnyu kosmonavтики V 3 t. T. 2* [Actual Issues of Aviation and Cosmonautics: Proceed. of the

VI International Scientific-Practical Conference, Dedicated to Cosmonautics Day. In 3 vols. Vol. 2]. Krasnoyarsk, Siberian State University of Science and Technology named after academician M. F. Reshetnev, pp. 363-365, EDN: HTSCIG. (In Russian).

11. Karpachevsky A.M., Novakovsky B.A., 2019. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya instrumentov GIS-paketa ArcGIS dlya strukturnogo analiza elektricheskikh setey* [Capabilities of ARCGIS tools for structure analysis of power grids]. *Geoinformatika* [Geoinformatics], no. 2, pp. 4-11, EDN: CTZDHU. (In Russian).

12. Jibril M.S., Aule D.S., Garba B.D., Adewuyi T.O., 2023. Network Analysis of Road Traffic Crash and Rescue Operations in Federal Capital City. *International Journal of Geosciences*, vol. 14, no. 01, pp. 36-51, DOI: 10.4236/ijg.2023.141003, EDN: LCEFRK.

13. Vasilchenko A.A., 2022. *Prostranstvennyy analiz infrastruktury oroshaemykh poley Volgo-Akhtubinskoy poymy na territorii Volgogradskoy oblasti* [Spatial analysis of the Volga-Akhtuba floodplain irrigated fields infrastructure in the Volgograd region]. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* [Scientific Agronomy Journal], no. 4(119), pp. 12-18, DOI: 10.34736/FNC.2022.119.4.002.12-18, EDN: SATKNY. (In Russian).

14. Ryzhakov A.N., Kuzmichev A.A., Martynov D.V., 2023. *Razrabotka geoinformatsionnoy bazy dannykh «Ponuro-Kalininskaya «Vodokhozyaystvennaya sistema»* [Development of the geoinformation database “Ponuro-Kalinin “Water Management System”]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 3(91), pp. 238-249, EDN: YNZVUX. (In Russian).

15. Shchedrin V.N., Kolganov A.V., Vasiliev S.M., Churaev A.A., 2013. *Orositel'nye sistemy: ot pokoleniya k pokoleniyu: monografiya. V 2 ch. Ch. 1* [Irrigation Systems: from Generation to Generation: monograph. In 2 parts, part 1]. Novocherkassk, Helikon Publ., 283 p., ISBN 5-93542-042-2, EDN: TRAHID.

Информация об авторе

А. Н. Рыжаков – научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, xrust.89@bk.ru, AuthorID: 784962, ORCID ID: 0000-0002-9268-255X.

Information about the author

A. N. Ryzhakov – Researcher; Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, xrust.89@bk.ru, AuthorID: 784962, ORCID ID: 0000-0002-9268-255X.

*Автор несет ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.
The author is responsible for violation of scientific publication ethics.*

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 11.04.2025; принята к публикации 09.06.2025.
The article was submitted 01.04.2025; approved after reviewing 11.04.2025; accepted for publication 09.06.2025.*