

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.6; 528.854; 550.3

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-67-90

Методические вопросы обнаружения и картирования закрытых коллекторов осушительных мелиоративных систем способом георадарной съемки

Григорий Борисович Остапчук

Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург,
Российская Федерация, ost@agrophys.ru

Аннотация. Цель: разработка методических вопросов обнаружения и картирования закрытых коллекторов способом георадарной съемки. **Материалы и методы.** Работы выполнены на участке трассы закрытого коллектора, расположенного в границах осушенного поля Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (Гатчинский район Ленинградской области). В исследовании использовался двухчастотный георадар-моноблок «ОКО-3» с антенным блоком АБ-400/900 МГц в комплектации с планшетным компьютером. **Результаты.** В общем случае благоприятные почвенные условия для обнаружения исправного закрытого коллектора способом георадарной съемки на временном отрезке «весна – лето» наблюдаются в весенний период, а для закрытых коллекторов, проходящих по пониженным элементам рельефа – тальвегам ложбин – также и в летний период времени. Выявление на радарограмме трех и более локальных объектов – признаков закрытого дренажа, составляющих на местности одну прямую линию, – эквивалентно одному поисковому шурфу, выполненному средствами механизации или вручную в месте расположения закрытого коллектора. Диапазон частот антенны георадара, обеспечивающий обнаружение закрытого дренажа, находится в пределах 250–500 МГц. **Выводы.** Результативность обнаружения исправного закрытого коллектора способом георадарной съемки при прочих равных условиях находится в зависимости от наличия влагонасыщенного состояния придренного слоя почвы и присутствия в трубке закрытого коллектора воздушной полости. Полевые работы по обнаружению закрытого коллектора указанным способом предусматривают пересечение георадаром трассы закрытого коллектора в нескольких местах в перпендикулярном закрытому коллектору направлении. Работы по картированию закрытого коллектора на основе данных георадарной съемки предусматривают установление диапазона глубин, выявленных на радарограмме локальных объектов, их отбор по глубине и плановому положению – расположению на одной прямой линии – и картирование по одной из точек на такой линии участка(ов) съемки.

Ключевые слова: георадар «ОКО-3», метод георадиолокации, закрытый коллектор, закрытый трубчатый дренаж, гидротехническая мелиорация, осушение, обнаружение, картирование, космический снимок

Финансирование: работа финансировалась в рамках Государственного задания по теме: FGEG-2022-0007 «Развить теоретические и методологические основы управления агроклиматическими и агроэкологическими рисками, плодородием почв, мелиоративным, фитосанитарным состоянием и продуктивностью агроэкосистем мелиорированных земель в условиях наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений с применением дистанционного зондирования, математического моделирования и цифровизации информационного обеспечения», регистрационный номер НИОКТР: 122123000008-1.

Для цитирования: Остапчук Г. Б. Методические вопросы обнаружения и карти-

рования закрытых коллекторов осушительных мелиоративных систем способом георадарной съемки // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 67–90. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-67-90>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Methodological issues of detection and mapping of subsurface collectors of drainage reclamation systems using georadar survey

Grigory B. Ostapchuk

Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation, ost@agrophys.ru

Abstract. Purpose: to develop methodological issues of detection and mapping of subsurface collectors by the method of ground-penetrating radar survey. **Materials and methods.** The work was carried out on a section of the subsurface collector route located within the boundaries of the drained field of the Menkovskiy branch of the Agrophysical Research Institute (Gatchinsky district, Leningrad region). The dual-frequency ground-penetrating radar monoblock “OKO-3” with an AB-400/900 MHz antenna unit in a complete set with a tablet computer was used. **Results.** In general, favorable soil conditions for detecting a serviceable subsurface collector using the method of ground-penetrating radar survey in the “spring – summer” time interval are observed in the spring period, and for subsurface collectors passing through low relief elements – hollow thalwegs – also in the summer period. Detection of three or more local objects on a radargram – signs of subsurface drainage that form one straight line on the ground – is equivalent to one search pit made by mechanical means or manually at the location of the subsurface collector. The frequency range of the ground penetrating radar antenna that ensures detection of closed drainage is within 250–500 MHz. **Conclusions.** The efficiency of detecting a serviceable subsurface collector using the ground penetrating radar survey method, all other things being equal, depends on the presence of a moisture-saturated state of the adjacent soil layer and the presence of an air cavity in the subsurface collector tube. Fieldwork to detect a subsurface collector using the specified method involves the ground penetrating radar crossing the subsurface collector route in several places in a direction perpendicular to the subsurface collector. Work on mapping a subsurface collector based on ground penetrating radar survey data involves establishing the depth range of local objects identified on the radargram, their selection by depth and planned position – location on one straight line – and mapping by one of the points on such a line of the survey site(s).

Keywords: OKO-3 ground penetrating radar, ground penetrating radar method, subsurface collector, closed pipe drainage, hydraulic reclamation, drainage, detection, mapping, satellite image

Funding: the work was funded within the framework of the State Assignment on the theme: FGEG-2022-0007 “Development of theoretical and methodological foundations for managing the agroclimatic and agroecological risks, soil fertility, reclamation, phytosanitary condition and productivity of agroecosystems of reclaimed lands under conditions of observed and projected climate change using remote sensing, mathematical modeling and digitalization of information support”, registration number of Research, Development and Engineering: 122123000008-1.

For citation: Ostapchuk G. B. Methodological issues of detection and mapping of subsurface collectors of drainage reclamation systems using georadar survey. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(3):67–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-67-90>.

Введение. Вопрос картирования закрытого трубчатого дренажа возникает при проектировании мероприятий по реконструкции и ремонту закрытых осушительных мелиоративных систем. Целью такого картирования является восстановление в плане схемы существующего закрытого дренажа в условиях отсутствия архивных планово-картографических материалов на его строительство (далее – исполнительной документации)¹.

Решение данной задачи по существующей технологии предполагает проложение поисковых траншей средствами механизации^{2, 3} с последующей инструментальной геодезической съемкой обнаруженных трасс закрытого дренажа. Альтернативой является проведение аэрофотосъемки осушенных полей, в том числе с беспилотных летательных аппаратов [1–3], или привлечение архивных космических снимков [4] с последующим дешифрированием по ним дренажных трасс. Однако результативность таких альтернативных способов картирования зависит от наличия дешифровочных признаков закрытого дренажа на аэрофото- и космических снимках.

В то же время условием для проведения таких ремонтных и строительных работ, как промывка дренажа, дополнительное строительство дренажных линий или их переустройство, является предварительное обнаружение трасс закрытого дренажа на местности вне зависимости от наличия исполнительной документации [5]. В связи с этим объем механизированных работ по обнаружению закрытого дренажа зависит от наличия схемы его планового положения или результатов ее восстановления дистанционными способами.

¹Временные рекомендации по реконструкции осушительных систем в Нечерноземной зоне РСФСР. Л.: СевНИИГиМ, 1989. 70 с.

²Методические указания по проведению наблюдений за мелиоративным состоянием осушенных земель. Л., 1972. 154 с.

³Руководство по мелиорации полей / Г. Г. Гулюк, Ю. Г. Янко, В. И. Штыков, М. Б. Черняк, А. Ф. Петрушин. СПб: АФИ, 2020. 217 с.

Стремление к сокращению объема механизированных работ ведет к поиску новых способов обнаружения и картирования закрытого дренажа. К такому появившемуся относительно недавно способу можно отнести георадиолокационную съемку [6], осуществляемую радиотехническим прибором подповерхностного зондирования – георадаром. Принцип работы георадара рассмотрен в работе [7]. Опыт применения георадара для обнаружения и картирования закрытого трубчатого дренажа представлен в работах зарубежных авторов [3, 8, 9]. В отечественной литературе применение георадара для решения задач в области мелиорации и водного хозяйства рассмотрено на примерах оценки технического состояния крупных гидротехнических сооружений [10, 11]. В связи с этим методические вопросы обнаружения и картирования закрытого дренажа на осушенных сельскохозяйственных угодьях способом георадарной съемки нуждаются в более подробном освещении.

Картирование и обнаружение закрытого дренажа рассмотрены как самостоятельные этапы единого комплекса исследовательских работ. При этом под обнаружением понимаются работы, результатом которых является точное обозначение на местности местоположения дренажных трасс, а под картированием – отображение положения дренажных трасс на плане с точностью, соответствующей его масштабу.

Целью настоящего исследования является разработка методических вопросов обнаружения и картирования закрытого дренажа способом георадарной съемки, а также рассмотрение ключевых зависимых факторов и условий, влияющих на результативность указанных работ.

Материалы и методы. Работы по обнаружению и картированию закрытого дренажа способом георадарной съемки выполнены на примере участка трассы закрытого коллектора, расположенного в границах поля № 4 Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследова-

тельский институт», Гатчинский район Ленинградской области. Географические координаты центра участка: 59°24'43" с. ш., 30°00'11" в. д. Влияние отдельных факторов и условий на результат георадарной съемки рассмотрено на примере дополнительных полевых данных.

Согласно данным исполнительной документации, закрытый коллектор построен в 1970 г. и в границах обследуемого участка представлен гончарным трубопроводом с внутренним диаметром 75 мм и глубиной заложения 0,9 м. Трасса закрытого коллектора в указанном месте проходит по тальвегу ложбины и расположена на границе вымочки сельскохозяйственных культур, систематически оставляемой без агрономической обработки.

В исследовании использовался двухчастотный георадар-моноблок «ОКО-3» с антенным блоком АБ-400/900 МГц, перемещаемый на салазках, в комплектации с планшетным компьютером Samsung SM-T225.

На основе географических координат, получаемых с GPS-датчика указанного планшетного компьютера, осуществлялось как позиционирование на местности посредством программного обеспечения – географической информационной системы QField, так и автоматическая географическая привязка георадиолокационных профилей в программном обеспечении CartScan (далее – ПО CartScan).

Составление план-схемы участка георадарной съемки и пространственный анализ выявленных на радарограмме локальных объектов осуществлялись в программном обеспечении географической информационной системы с открытым кодом QGIS; обработка и анализ радарограмм в полевых и камеральных условиях – в ПО CartScan.

В качестве топографической основы план-схемы использовались полученные из федерального фонда данных дистанционного зондирования Земли из космоса Госкорпорации «Роскосмос» космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения (величина пространственного

разрешения менее 1 м), с космического аппарата Ресурс-П1 с датами съемки 06.08.2014 и 17.05.2017⁴.

Результаты и обсуждение. *Признак закрытого дренажа на радарограммах.* Задача по анализу радарограмм заключалась в выявлении на них дешифровочного признака закрытого дренажа – рисунка гиперболы (далее также – локальный объект), вершина которой соответствует местоположению трубки дрены на профиле радарограммы (рисунок 1b). Указанный рисунок гиперболы возникает на радарограмме при пересечении закрытой трубчатой дрены георадаром в перпендикулярном или близком ему направлении [8].

Локальный объект на радарограмме представляет собой не саму стенку трубки дрены или трубку дрены в целом, а только то, что находится в ее полости – воздух, вода или наилот [12]. Степень четкости локального объекта на радарограмме зависит от диэлектрических свойств сред на границе локального объекта и количественно может быть выражена формулой (1):

$$K = \frac{(\sqrt{\varepsilon_{\text{почв}}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{сод.тр.}}})}{(\sqrt{\varepsilon_{\text{почв}}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{сод.тр.}}})}, \quad (1)$$

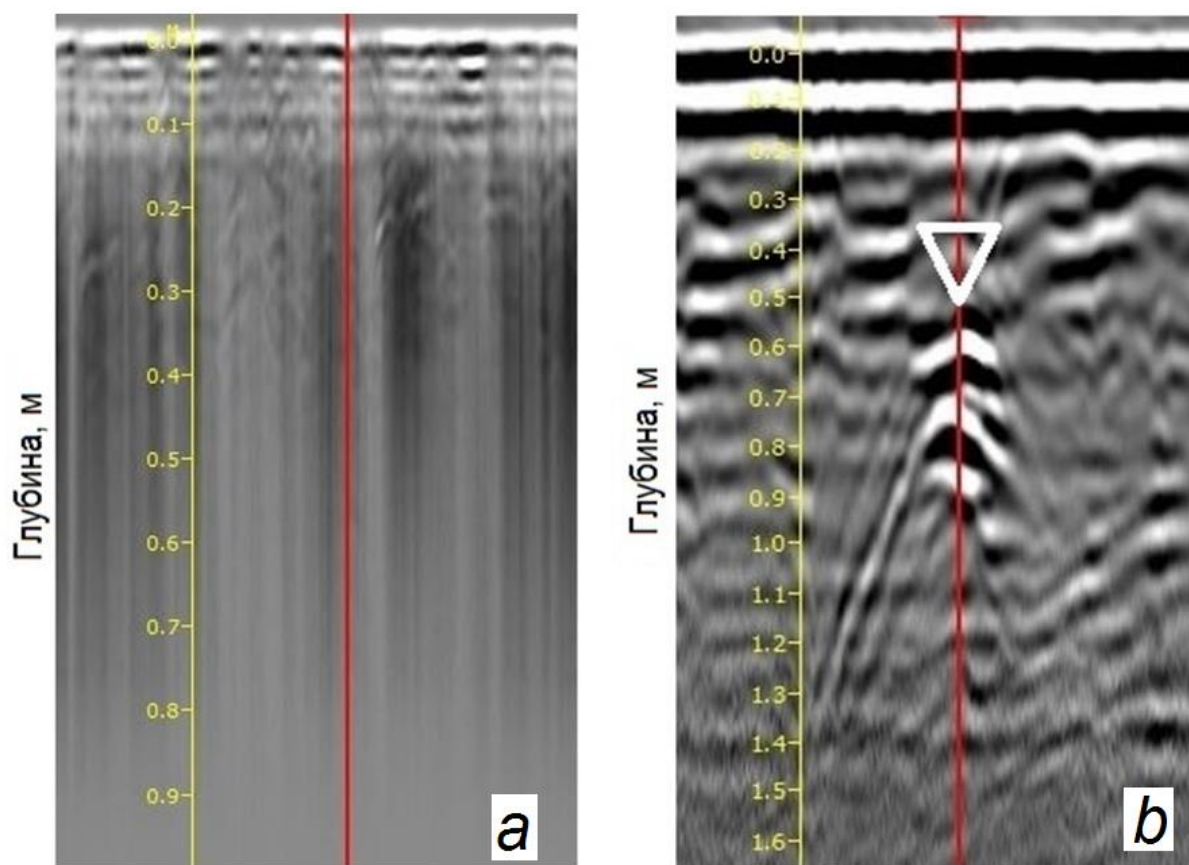
где K – коэффициент отражения электромагнитной волны;

$\varepsilon_{\text{почв}}$ – значение относительной диэлектрической проницаемости прирванного слоя почвы;

$\varepsilon_{\text{сод.тр.}}$ – значение относительной диэлектрической проницаемости содержимого полости трубки дрены⁵.

⁴Геопортал Роскосмоса [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gptl.ru/> (дата обращения: 09.12.2024).

⁵Владов М. Л., Судакова М. С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие. М.: ГЕОС, 2017. 239 с.



a – радарограмма (фрагмент), полученная на частоте 900 МГц;
b – радарограмма (фрагмент), полученная на частоте 400 МГц

К обеим радарограммам применены функции усиления и контраста сигнала; красные линии на профиле радарограмм соответствуют местоположению гончарного закрытого коллектора; вершиной треугольника обозначен верх трубки закрытого коллектора; внутренний диаметр закрытого коллектора 100 мм, степень заиления до 50 %, глубина заложения 0,7 м; дата съемки 24 июля 2024 г.

a – radargram (fragment) obtained at a frequency of 900 MHz;
b – radargram (fragment) obtained at a frequency of 400 MHz

The functions of signal amplification and contrast were applied to both radargrams; the red lines on the radargram profile correspond to the location of the closed pottery collector; the top of the closed collector tube is indicated by the apex of the triangle; the internal diameter of the subsurface collector is 100 mm, the degree of siltation is up to 50 %, the depth of the emplacement is 0.7 m; the date of survey is July 24, 2024

Рисунок 1 – Влияние частоты антенны георадара на степень четкости признака закрытого коллектора на радарограмме

Figure 1 – Effect of the frequency of the ground penetrating radar antenna on the degree of clarity of the subsurface collector sign on the radargram

Величина относительной диэлектрической проницаемости принимает следующие значения: для воздуха – 1, воды – 81, песка сухого 4–7, песка влажного 5–15⁵, керамики – 3–7 [13]. Соответственно, при исправном со-

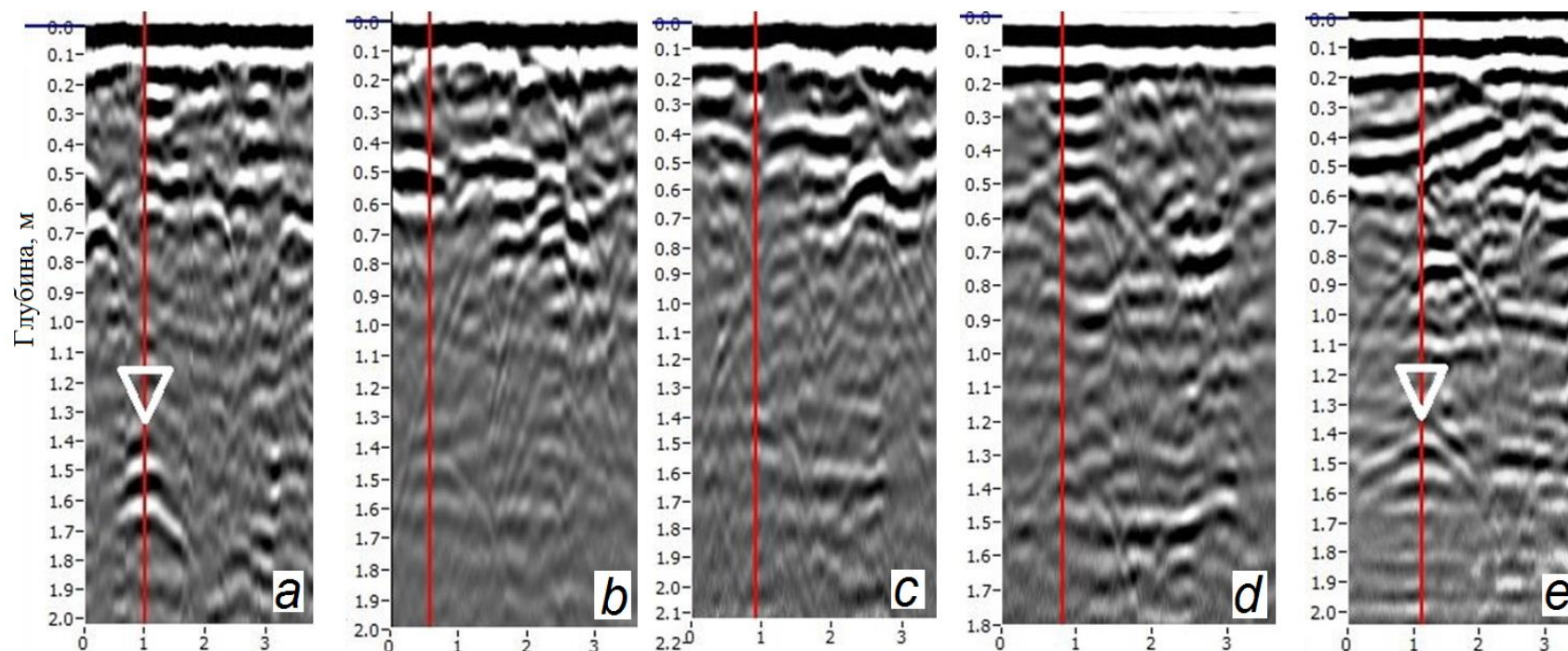
стоянии закрытой трубчатой дрены, то есть при наличии в ее трубке воздушной полости, значение коэффициента отражения, согласно формуле (1), возрастает с увеличением влажности придренного слоя почвы.

Выбор частоты антенны георадара для проведения съемки. Используемый георадар «ОКО-3» оборудован двумя антеннами, позволяющими получать одновременно две радарограммы на частотах 400 и 900 МГц с глубиной выявления объектов до 1,5 и 3 м соответственно⁶. Это обусловило задачу проведения сравнительного анализа степени выраженности признаков закрытого дренажа на радарограммах, полученных одновременно на обеих частотах (рисунок 1).

Как видно из рисунка 1, признак закрытого коллектора в виде рисунка гиперболы обнаруживается только на радарограмме, полученной на частоте 400 МГц, тогда как на радарограмме, полученной на частоте 900 МГц, такой признак отсутствует, что обусловлено недостаточной глубиной антенны. В связи с этим для выявления трасс закрытого дренажа в исследовании использовались радарограммы, полученные на частоте 400 МГц. Другими частотами, рекомендуемыми на основе опытных данных, являются 250 МГц [13, 14] и 500 МГц [9].

Выбор времени года для проведения съемки. Анализ влияния времени года на степень четкости признака закрытого дренажа на радарограмме был выполнен на примере серии радарограмм, полученных при съемке одной и той же исправной закрытой трубчатой дрены, местоположение которой было установлено шурфовкой (рисунок 2).

⁶Георадар «ОКО-3». Универсальный базовый комплект. [Электронный ресурс]. URL: https://www.geotech.ru/georadar_oko3/ (дата обращения: 10.02.2025).



a–d – радарограммы (фрагменты) на частоте 400 МГц, полученные 3 мая, 10 июня, 12 июля и 26 августа 2024 г. и 2 июля 2025 г. соответственно. Ось абсцисс – дистанция в метрах; ко всем радарограммам применены функции усиления и контраста сигнала; красные линии на профиле радарограмм соответствуют местоположению закрытой трубчатой дрены; вершиной треугольника на радарограмме 3 мая 2024 г. и 2 июля 2025 г. обозначен верх трубки дрены; внутренний диаметр трубки дрены 50 мм, глубина заложения 1,47 м

a–d – radargrams (fragments) at a frequency of 400 MHz, obtained on May 3, June 10, July 12 and August 26, 2024 and July 2, 2025, respectively. The abscissa axis is the distance in meters; the signal gain and contrast functions are applied to all radargrams; the red lines on the radargram profile correspond to the location of the closed tubular drain; the apex of the triangle on the radargram of May 3, 2024 and July 2, 2025 indicates the top of the drain tube; the internal diameter of the drain tube is 50 mm, the depth is 1.47 m

Рисунок 2 – Влияние времени года съемки на степень четкости признака гончарной закрытой трубчатой дрены на радарограмме
Figure 2 – Effect of the season of the survey on the degree of clarity of the sign of a pottery closed tubular drain on the radargram

Анализ радарограмм, полученных в 2024 г., показывает, что отчетливый признак закрытого дренажа, представленный рисунком гиперболы, присутствует на радарограмме, полученной 3 мая, в меньшей степени – на радарограмме, полученной 10 июня, и неотличим от общего фона на радарограммах, полученных в остальные дни засушливого лета – 12 июля и 26 августа. В то же время на рисунке 2*d* видно, что при наличии избыточных осадков⁷ в летний период времени, рассматриваемый признак закрытого дренажа может быть также достаточно четко представлен на радарограмме. При этом как в весенний, так и в летний периоды при наличии избыточных осадков на рассматриваемой дренажной системе отмечается относительно большой дренажный сток. Таким образом, степень четкости признака закрытого дренажа на радарограмме находится в зависимости от времени года и сложившихся перед проведением съемки погодных условий. Высокая степень четкости указанного признака, обеспечивающая выявление закрытого дренажа на отрезке времени «весна – лето», в общем случае имеет место в весенний период, что обусловлено более высокой влажностью придренного слоя почвы. В исследовании [12] уточняется, что наиболее благоприятные почвенные условия для обнаружения закрытого дренажа наступают сразу после схода снежного покрова, когда влажность придренного слоя почвы наивысшая.

Методика обнаружения закрытого дренажа способом георадарной съемки. Работы по обнаружению закрытого коллектора способом георадарной съемки включали подготовительные камеральные и полевые работы.

Подготовительные камеральные работы состояли в сборе сведений о предполагаемом местоположении трассы закрытого коллектора и глубины его заложения в границах обследуемого участка, а также проектирова-

⁷По данным ближайшей к участку съемки метеостанции, расположенной в д. Белогорка, известно, что в семидневный период, предшествующий дате съемки, выпало 58 мм осадков. Источник: Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 14.07.2025).

нии в плане расположения линии георадиолокационного профиля⁸ (далее – линия профиля).

Предполагаемое местоположение обследуемого участка трассы закрытого коллектора было установлено на основе исполнительной схемы строительства закрытого дренажа и результатов полевого обследования смотровых колодцев, причем указанные ранее дешифровочные признаки закрытого коллектора на космических снимках отсутствовали. На основе данных исполнительной документации о глубине заложения закрытого коллектора в границах рассматриваемого участка, соответствующей 0,9 м, и его диаметра была рассчитана глубина, на которой расположен верх трубки закрытого коллектора, составившая 0,8 м, принятая за ориентировочное значение глубины подлежащих выявлению локальных объектов.

Линия профиля проектировалась по узловым точкам, которыми устанавливались ориентиры на местности и ограничивался участок георадарной съемки (далее – участок съемки). Узловые точки были спроектированы таким образом, чтобы линия профиля пересекала закрытый коллектор в перпендикулярном ему направлении (далее – пересечение) в трех и более местах. Количество указанных пересечений на участке съемки устанавливалось, учитывая требование обнаружения трассы закрытого дренажа по не менее чем трем выявленным локальным объектам, лежащим на одной прямой линии [9]. При этом любые два выявленные локальные объекты определяют направление трассы закрытого коллектора, а каждый последующий подтверждает наличие в указанном месте протяженного прямолинейного объекта – закрытого коллектора – и уточняет его направление. Выявление трех локальных объектов на одной прямой линии эквивалентно с точки зрения поисковых работ одному поисковому шурфу, выполненному сред-

⁸В литературе под термином «георадиолокационный профиль» часто подразумевают как маршрут георадарной съемки в плане, так и полученную волновую картину радарограммы (профиль).

ствами механизации в месте прохождения трассы закрытого коллектора. При недостаточности указанного числа выявленных локальных объектов для обнаружения закрытого коллектора количество пересечений корректируется на месте путем их увеличения. Расстояние между пересечениями устанавливается исходя из размера участка, минимизации работ и удобства движения георадара при поворотах на узловых точках и может варьироваться от 3 м, по нашим данным, до 5–20 м [9, 14].

Количество участков съемки, устраиваемых на трассе закрытого коллектора, определяется поисковой задачей. Для обнаружения протяженного прямолинейного участка закрытого коллектора при отсутствии на нем устьевого сооружения или смотрового колодца георадарная съемка проводится на двух участках съемки на обоих предполагаемых концах трассы закрытого коллектора, а при их наличии – на одном. Так как местоположение обследуемого закрытого коллектора в месте его подключения к смотровому колодцу было заранее известно, то работа проводилась на одном участке. Количество пересечений предполагаемой трассы закрытого коллектора линией профиля было запроектировано в четырех местах с расстоянием между такими пересечениями 5 м.

Требования к точности обнаружения трассы закрытого коллектора на местности. Учитывая, что при небольших объемах работ поисковые шурфы могут выполняться вручную², требования к точности обнаружения трасс закрытого дренажа на местности обусловлены необходимостью снижения объема ручных работ по разработке поисковых шурфов. Принимая во внимание то обстоятельство, что визуальный контроль обнаружения трассы закрытого коллектора в шурфе осуществляется по траншейной засыпке, точность определения планового положения обнаруженной способом георадарной съемки трассы закрытого дренажа должна находиться в пределах половины ширины дренажной траншеи, значение которой зависит от применяемой технологии строительства дренажа: при траншейной

укладке дренажа ширина дренажной траншеи составляет до 50–80 см, при узкотраншейной укладке – до 25–30 см⁹.

Полевые работы включали:

- установку вех-ориентиров в узловых точках;
- проход георадаром по линии профиля, размеченной указанными вехами, с одновременной установкой съемочных вех в местах выявления на радарограмме локальных объектов;
- анализ направления и прямолинейности линии, образованной выставленными съемочными вехами.

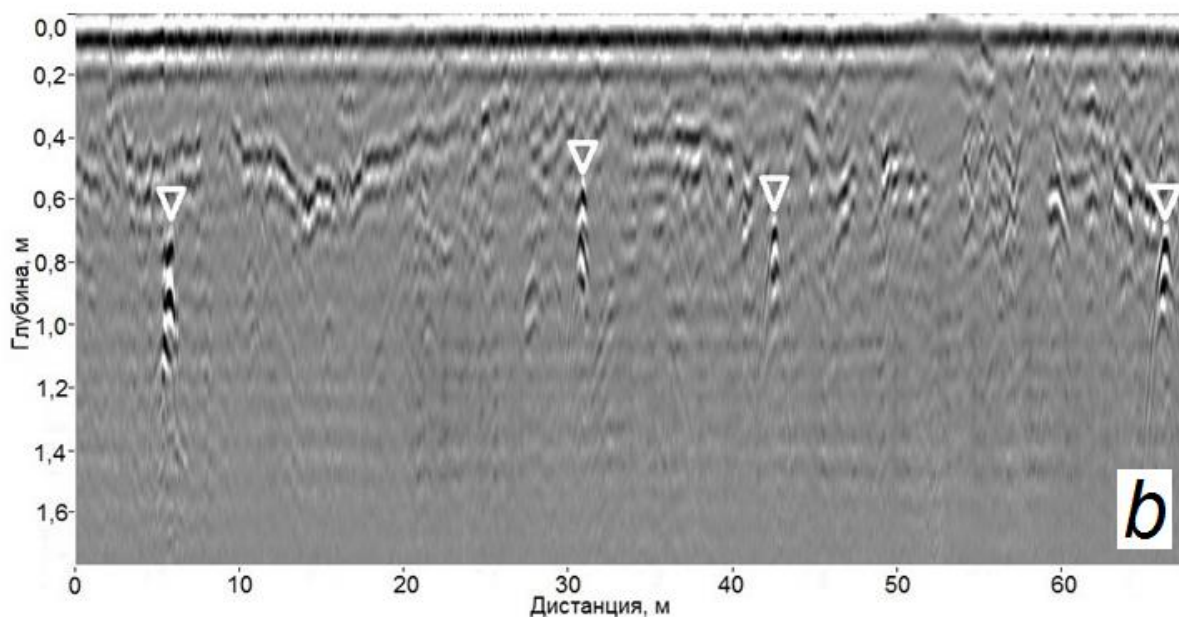
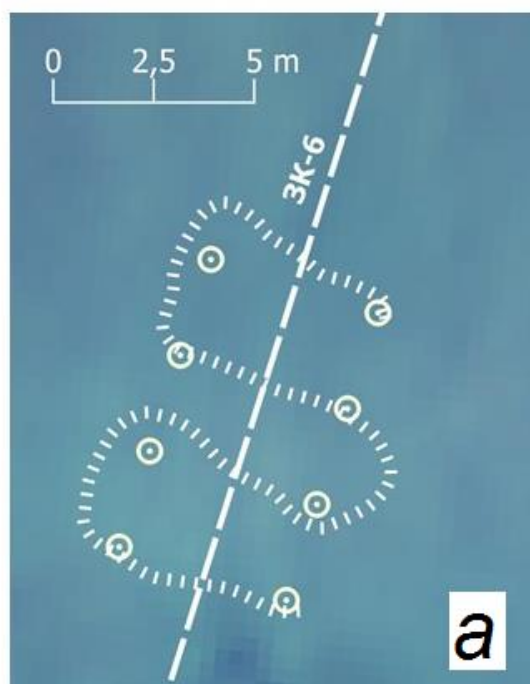
Ключевые этапы работ представлены рисунке 3.

Как видно на план-схеме, линия профиля, пройденная георадаром, пересекает предполагаемую трассу закрытого коллектора в четырех местах, где теоретически должны быть выявлены четыре локальных объекта. При проходе георадаром по линии профиля на радарограмме были последовательно выявлены (рисунок 3b) и отмечены съемочными вехами на местности четыре локальных объекта. Указанные вехи составили на местности прямую линию (рисунок 3c), что подтверждает наличие в границах участка съемки протяженного прямолинейного объекта. Учитывая данные исполнительной документации об объекте обследования, обнаруженный линейный объект является закрытым коллектором.

В целях подтверждения результатов работ и выяснения факторов, обусловивших высокую степень четкости признака закрытого дренажа на радарограмме, полученной в летний период времени, была выполнена шурфовка закрытого коллектора, а также бурение в границах вымочки. Место шурфа обозначено на план-схеме (рисунок 4) и на фотографии (рисунок 3c). В результате шурфовки в указанном щупом месте был обнаружен

⁹Мелиоративные и строительные машины: учеб. для вузов по спец. «Гидромелиорация» / Б. А. Васильев, И. И. Мер, Г. Т. Прудников, Г. А. Рябов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 430 с.

гончарный закрытый трубчатый коллектор с внутренним диаметром 100 мм – большим, чем по данным исполнительной документации (75 мм), глубиной заложения 73 см – меньшей, чем по данным исполнительной документации (90 см) и степенью заиления влажным наилком 50 % при остальной части полости трубки порожней (рисунки 5а, 5b). Таким образом, результат шурфовки подтверждает наличие трассы закрытого коллектора в месте, установленном при проведении георадарной съемки.



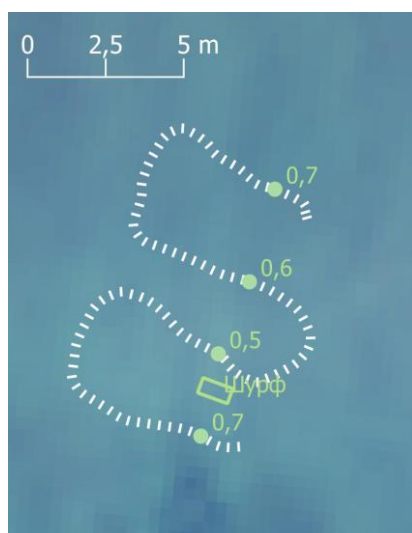


a – план-схема участка съемки (кружками с точками обозначено местоположение узловых точек – мест установки вех-ориентиров; зигзагообразной пунктирной линией обозначена линия профиля, пройденная георадаром, с ее началом на южном конце; полужирной пунктирной линией обозначена предполагаемая трасса закрытого коллектора); *b* – радарограмма, полученная 24 июля 2024 г. на участке съемки (вершинами треугольников обозначено местоположение выявленных локальных объектов); *c* – фотография участка съемки (съёмочными вехами с наклоном влево обозначено местоположение выявленных локальных объектов; щупом, стоящим рядом с антенным блоком георадара, указано место, выбранное для шурфа). Изображение второго слева локального объекта на рисунке 3*b* представлено крупным планом на рисунке 1*b*

a – plan-scheme of the survey area (circles with dots indicate the location of the nodal points – the installation sites of landmarks; a zigzag dotted line indicates the profile line passed by the ground penetrating radar, with its beginning at the southern end; a bold dotted line indicates the supposed route of the closed collector); *b* – a radargram obtained on July 24, 2024 at the survey area (the vertices of the triangles indicate the location of the identified local objects); *c* – a photograph of the survey area (surveying poles tilted to the left indicate the location of the identified local objects; a probe standing next to the antenna unit of the ground penetrating radar indicates the place chosen for the pit). The image of the second local object from the left in Figure 3*b* is shown in close-up in Figure 1*b*

Рисунок 3 – Обнаружение закрытого коллектора способом георадарной съемки (автор фото Г. Б. Остапчук)

Figure 3 – Detection of a subsurface collector using georadar survey (photo by G. B. Ostapchuk)



Зигзагообразной пунктирной линией обозначена линия профиля, пройденная георадаром; точками обозначено местоположение выявленных на радарограмме локальных объектов с указанием их расчетной глубины; прямоугольником обозначено местоположение шурфа

The zigzag dotted line indicates the profile line passed by the ground penetrating radar; the dots indicate the location of local objects identified on the radargram with their estimated depth; the rectangle indicates the location of the pit

Рисунок 4 – План-схема участка георадарной съемки с выявленными на радарограммах локальными объектами

Figure 4 – Plan-scheme of the ground penetrating radar survey area with local objects identified on the radargrams



a – фотография трубки закрытого коллектора в шурфе; *b* – трубка закрытого коллектора; *c* – фотография трубопровода закрытого коллектора, сделанная в сторону по течению от места шурфа

a – photograph of a subsurface collector pipe in a pit; *b* – subsurface collector pipe; *c* – photograph of a subsurface collector pipeline taken downstream from the pit location

Рисунок 5 – Результат шурфовки и обследования закрытого коллектора (автор фото Г. Б. Остапчук)

Figure 5 – Result of pitting and inspection of a subsurface collector (photo by G. B. Ostapchuk)

Обследование трубопровода закрытого коллектора техническим эндоскопом jProbe LXP-230-4000 по обе стороны от шурфа – на 5 м против течения и 12 м по течению – показало, что степень его заиления на указанном участке неравномерная и в целом составляет менее 50 % (рисунок 5с). Таким образом, трубопровод закрытого коллектора на обследуемом участке характеризуется наличием воздушной полости на $\frac{1}{2}$ и более диаметра его внутреннего сечения.

Результаты бурения показали, что гранулометрический состав почвы на глубине 50 см представлен средним суглинком и на глубине 80–90 см – водонасыщенным связным песком.

Таким образом, результаты шурфовки и бурения в совокупности подтверждают условия, обеспечившие высокую степень четкости признака закрытого дренажа на радарограмме в летний период года, а именно: наличие влагонасыщенного состояния придренного слоя почвы при наличии порожней полости в трубке закрытого коллектора.

Совершенствование полевых работ. При комплектации георадара полевым ноутбуком и геодезическим GPS-приемником, соединенным с ним через кабель, методика проведения полевых работ может быть оптимизирована за счет исключения необходимости расстановки вех-ориентиров в узловых точках. Это становится возможным за счет одновременного и совместного осуществления как позиционирования на местности по план-схеме участка съемки в ГИС QGIS, так и записи радарограммы в фоновом режиме в ПО CartScan.

Методика картирования закрытого дренажа способом георадарной съемки. Картирование закрытого дренажа способом георадарной съемки осуществляется в камеральных условиях и включает следующие этапы работ: 1) анализ глубины выявленных локальных объектов и отбор их по данному параметру; 2) анализ планового положения отобранных локальных объектов и картирование закрытого коллектора.

1) Анализ глубины и отбор выявленных локальных объектов. Глубина верха трубки закрытого коллектора в границах участка съемки, рассчитанная по данным исполнительной документации, как отмечено ранее, составила 0,8 м (далее – заданная глубина). На основе одного из выявленных на радарограмме локальных объектов с помощью специальной функции ПО CartScan была осуществлена калибровка шкалы глубин радарограммы, после чего были установлены глубины выявленных локальных объектов (далее – расчетная глубина). Радарограмма после калибровки шкалы глубин и план-схема с выявленными локальными объектами представлены на рисунках 3*b*, 4.

Как видно на радарограмме и план-схеме, все четыре выявленных локальных объекта находятся на расчетной глубине 0,5–0,7 м. Фактическая глубина верха трубки закрытого коллектора, установленная его шурфовкой на отрезке между первым и вторым выявленными локальными объектами, составила 0,6 м.

Таким образом, исходное значение заданной глубины – 0,8 м – не соответствует фактической глубине закрытого коллектора 0,6 м и его расчетной глубине 0,5–0,7 м. Это обуславливает необходимость расширить диапазон исходного значения заданной глубины с целью отбора выявленных локальных объектов для последующего картирования по ним закрытого коллектора. Расширение диапазона глубин позволяет учесть изменчивость высотного положения георадара при его движении по линии профиля, вызванную микрорельефом сельскохозяйственного поля, а также наличие возможных неточностей при определении расчетной глубины выявленных на радарограмме локальных объектов, относящихся к трассе закрытого коллектора. Увеличение диапазона заданной глубины ведет к увеличению количества локальных объектов, в том числе и не относящихся к закрытому дренажу, напротив, его сужение приводит к возможному исключению локальных объектов, представляющих трассы закрытого дренажа. Как вид-

но на рисунке 5, для соответствия критерию картирования закрытого коллектора по трем локальным объектам диапазон значений заданной глубины следует принять равным $0,8 \pm 0,2$ м, а по всем четырем выявленным и относящимся к нему локальным объектам – $0,8 \pm 0,3$ м.

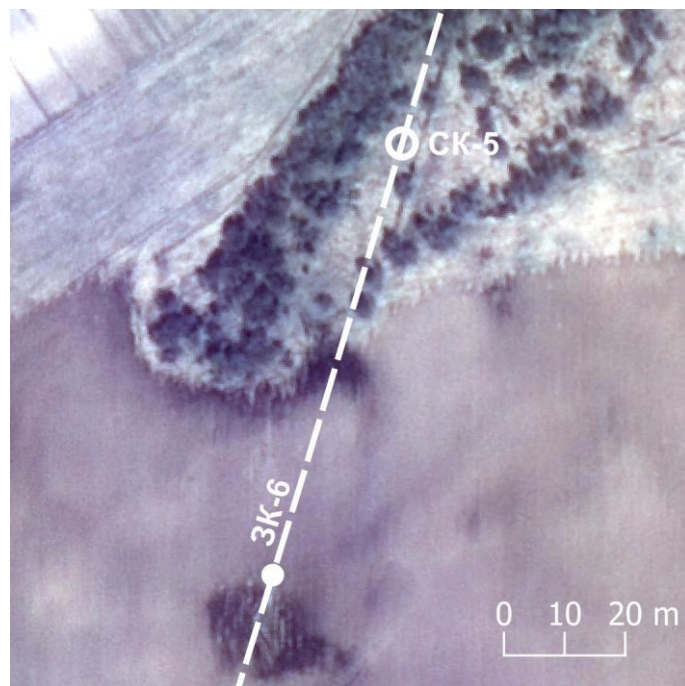
2) Анализ планового положения отобранных локальных объектов и картирование закрытого коллектора. На план-схеме (рисунок 4) анализ местоположения выявленных в границах выбранного диапазона глубин – $0,8 \pm 0,2$ м – трех локальных объектов (первого, третьего и четвертого) показывает, что они лежат вдоль прямой линии с отступом от нее в пределах $\pm 0,1$ м; второй локальный объект, исключенный из картирования, расположен с отступом от указанной линии $0,5$ м¹⁰.

Выбор любой точки на указанной прямой линии при известной второй точке позволяет осуществить картирование трассы закрытого коллектора. В качестве первой точки выбрано местоположение третьего локального объекта, а второй – выпуск трубы закрытого коллектора в смотровом колодце, расположенном в 152 м от шурфа (рисунок 6).

Точность планового положения картированного закрытого коллектора. Оценка точности картирования была выполнена на примере картирования смотрового колодца СК-7 (план-схема в работе [4]), географические координаты которого были получены как с GPS-датчика планшетного компьютера, используемого для георадарной съемки, так и в результате проведения топографической съемки комплектом GPS-приемников. Разница между полученными координатами составила 1,7 м, что соответствует точности плана масштаба 1:5000 (менее 2,5 м, или 0,05 мм на плане). Результаты картирования, полученные с такой точностью, не исключают необходимости обнаружения трассы закрытого коллектора на местности

¹⁰ Возникновение такого отступа обусловлено несовершенством работы GPS-датчика планшетного компьютера. В полевых условиях выставленные съемочные вехи, как отмечено ранее, образовали прямую линию (рисунок 3с).

при дальнейших строительных или ремонтных работах закрытого дренажа, так как превышают требования к точности обнаружения трасс закрытого дренажа, а также не могут быть использованы для составления планов закрытой мелиоративной системы в масштабе 1:2000.



Точкой обозначено местоположение третьего локального объекта – первая точка картирования; кружком обозначено местоположение смотрового колодца – второй точки картирования; полуширной пунктирной линией между указанными точками обозначен картированный участок трассы закрытого коллектора

The dot indicates the location of the third local object – the first mapping point; the circle indicates the location of the inspection well – the second mapping point; the bold dotted line between the indicated points indicates the mapped section of the subsurface collector route

Рисунок 6 – Картированный способом георадарной съемки закрытый коллектор (космоснимок с КА Ресурс-П1, 17.05.2017)

Figure 6 – Subsurface collector mapped using ground penetrating radar (space image from the Resurs-P1 spacecraft, 17.05.2017)

Повышение точности картирования. Решение вопроса повышения точности картирования представляется на основе включения в комплектацию георадара двух геодезических GPS-приемников – одного установленного на антенном блоке георадара и соединенного через кабель с полевым ноутбуком, а другого используемого в качестве базовой станции. Вопрос точности планового положения выявляемых при проведении георадарной

съемки локальных объектов в указанной комплектации в условиях движения антенного блока георадара по неровной поверхности сельскохозяйственного поля требует дальнейшей разработки.

Выводы. Подводя итоги представленной работы можно сделать следующие выводы.

1 Результативность обнаружения исправного закрытого коллектора способом георадарной съемки при прочих равных условиях находится в зависимости от наличия влагонасыщенного состояния придренного слоя почвы и присутствия в трубке закрытого коллектора воздушной полости. Такие благоприятные почвенные условия на временном отрезке «весна – лето» в общем случае наблюдаются в весенний период, а для трасс закрытых коллекторов, проходящих по пониженным элементам рельефа – тальвегам ложбин, также и в летний период времени.

2 Методика проведения полевых работ по обнаружению трассы закрытого коллектора способом георадарной съемки предусматривает пересечение георадаром трассы закрытого коллектора в нескольких местах в перпендикулярном закрытому коллектору направлении. Выявление трех и более локальных объектов, расположенных на одной прямой линии в предполагаемом закрытому коллектору направлении, эквивалентно одному поисковому шурфу, выполненному средствами механизации или вручную в месте обнаружения закрытого коллектора.

3 Картирование закрытого коллектора на основе данных георадарной съемки предусматривает установление диапазона глубин с последующим отбором на его основе выявленных локальных объектов, анализ планового положения отобранных локальных объектов по критерию расположения их на прямой линии в предполагаемом закрытому коллектору направлении и картирование закрытого коллектора по выбранным точкам на указанной линии участка(ов) съемки. Расширение диапазона глубин целесообразно осуществлять до значений, обеспечивающих картирование трассы закры-

того коллектора по критерию выявления трех локальных объектов на одной прямой линии, лежащих в предполагаемом направлении трассы закрытого коллектора.

4 Среди частот антенны георадара, обеспечивающих решение задач по обнаружению и картированию закрытого дренажа, нашли применение частоты в диапазоне от 250 до 500 МГц; большая частота антенны, например, 900 МГц, резко снижает глубинность проникновения сигнала георадара, что является препятствием для обнаружения закрытого дренажа.

Список источников

1. Мейер Г. Я., Кривоносов И. М. Применение аэрометодов для картирования закрытых дренажных систем // Труды лаборатории аэрометодов. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. Т. V. С. 83–106.
2. Overall results and key findings on the use of UAV visible-color, multispectral, and thermal infrared imagery to map agricultural drainage pipes / B. Allred, L. Martinez, M. K. Fessehazion, G. Rouse, T. N. Williamson, D. Wishart, T. Koganti, R. Freeland, N. Eash, A. Batschelet, R. Featheringill // *Agricultural Water Management*. 2020. Vol. 232. Article number: 106036. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106036. EDN: UDV SXZ.
3. Mapping of Agricultural Subsurface Drainage Systems Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery and Ground Penetrating Radar / T. Koganti, E. Ghane, L. R. Martinez, Bo. V. Iversen, B. J. Allred // *Sensors*. 2021. Vol. 21, iss. 8. Article number: 2800. DOI: 10.3390/s21082800. EDN: YUBSFG.
4. Картирование закрытого трубчатого дренажа по космическим снимкам сверхвысокого пространственного разрешения / Г. Б. Остапчук, А. Ф. Петрушин, Е. П. Митрофанов, А. С. Старцев // *Агрофизика*. 2024. № 1. С. 41–48. DOI: 10.25695/AGRPH.2024.01.06. EDN: MFWLLD.
5. Гинц А. А., Жегалев Ю. П. Способы обнаружения трасс дренажных систем на местности / Реконструкция мелиоративных систем: сб. науч. тр. Л.: СевНИИГиМ, 1990. С. 62–72.
6. Chow T. L., Rees H. W. Identification of subsurface drain locations with ground-penetrating radar // *Canadian Journal of Soil Science*. 1989. Vol. 69, no. 2. P. 223–234. DOI: 10.4141/cjss89-023.
7. Применение методов геофизики в мелиорации / В. А. Шевченко, С. В. Изюмов, С. И. Миронов, К. С. Полтарыхин // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2017. № 6. С. 44–46. EDN: ZXKPKB.
8. Detection of buried agricultural drainage pipe with geophysical methods / B. J. Allred, N. R. Fausey, L. Jr. Peters, C. Chen, J. J. Daniels, H. Youn // *Applied Engineering in Agriculture*. 2004. Vol. 20, iss. 3. P. 307–318. DOI: 10.13031/2013.16067.
9. Karásek P., Nováková E. Agricultural Tile Drainage Detection within the Year Using Ground Penetrating Radar // *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21, iss. 4. P. 203–211. DOI: 10.12911/22998993/119976. EDN: DGBSVD.
10. Диагностика с помощью приборов неразрушающего контроля железобетонной облицовки и грунтового основания для оценки технического состояния дамбы Крюковского водохранилища / М. А. Бандурин, И. А. Приходько, В. А. Волосухин,

А. А. Руденко // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 220–236. DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-220-236. EDN: GTHDRO.

11. Применение методов неразрушающего контроля для обследования гидротехнических сооружений / А. П. Истомина, Д. А. Солодовников, С. А. Истомина, И. А. Коваленко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 1(73). С. 381–392. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-43. EDN: НХАРОУ.

12. Allred B. J., Redman J. D. Location of Agricultural Drainage Pipes and Assessment of Agricultural Drainage Pipe Conditions Using Ground Penetrating Radar // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2010. Vol. 15, no. 3. P. 119–134. DOI: 10.2113/JEEG15.3.119.

13. Important considerations for locating buried agricultural drainage pipe using ground penetrating radar / B. J. Allred, J. J. Daniels, N. R. Fausey, C. Chen, L. Peters, Jr. H. Youn // Applied Engineering in Agriculture. 2005. Vol. 21, no. 1. DOI: 10.13031/2013.17915.

14. Becker A. M., Becker R. H., Doro K. O. Locating drainage tiles at a wetland restoration site within the Oak Openings region of Ohio, United States using UAV and land based geophysical techniques // Wetlands. 2021. Vol. 41, no. 8. P. 1–15. DOI: 10.1007/s13157-021-01495-6. EDN: IPAETJ.

References

1. Meyer G.Ya., Krivonosov I.M., 1956. *Primenenie aerometodov dlya kartirovaniya zakrytykh drenaznykh sistem* [Application of aerial methods for mapping subsurface drainage systems]. *Trudy laboratorii aerometodov* [Proceed. of the Laboratory of Aerial Methods]. Moscow-Leningrad, the USSR Academy of Sciences Publ., vol. V, pp. 83-106. (In Russian).

2. Allred B., Martinez L., Fessehazion M.K., Rouse G., Williamson T.N., Wishart D., Koganti T., Freeland R., Eash N., Batschelet A., Featheringill R., 2020. Overall results and key findings on the use of UAV visible-color, multispectral, and thermal infrared imagery to map agricultural drainage pipes. *Agricultural Water Management*, vol. 232, article number: 106036, DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106036, EDN: UDVSXZ.

3. Koganti T., Ghane E., Martinez L.R., Iversen Bo.V., Allred B.J., 2021. Mapping of Agricultural Subsurface Drainage Systems Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery and Ground Penetrating Radar. *Sensors*, vol. 21, iss. 8, article number: 2800, DOI: 10.3390/s21082800, EDN: YUBSFG.

4. Ostapchuk G.B., Petrushin A.F., Mitrofanov E.P., Startsev A.S., 2024. *Kartirovanie zakrytogo trubchatogo drenazha po kosmicheskim snimkam sverkhvysokogo prostranstvennogo razresheniya* [Mapping of agricultural subsurface drainage systems using ultra-high spatial resolution satellite images]. *Agrofizika* [Agrophysics], no. 1, pp. 41-48, DOI: 10.25695/AGRPH.2024.01.06, EDN: MFWLLD. (In Russian).

5. Ginz A.A., Zhigalev Yu.P., 1990. *Sposoby obnaruzheniya trass drenaznykh sistem na mestnosti* [Methods for detecting drainage system routes on the ground]. *Rekonstruktsiya meliorativnykh sistem: sb. nauch. tr.* [Reconstruction of Reclamation Systems: collect. of scientific papers]. Leningrad, SevNIIGiM, pp. 62-72. (In Russian).

6. Chow T.L., Rees H.W. 1989. Identification of subsurface drain locations with ground-penetrating radar. *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 69, no. 2, pp. 223-234, DOI: 10.4141/cjss89-023.

7. Shevchenko V.A., Izyumov S.V., Mironov S.I., Poltarykhin K.S., 2017. *Primenenie metodov geofiziki v melioratsii* [Application of techniques of geophysics in land reclamation]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 6, pp. 44-46, EDN: ZXKPKB. (In Russian).

8. Allred B.J., Fausey N.R., Peters L.Jr., Chen C., Daniels J.J., Youn H., 2004. Detection of buried agricultural drainage pipe with geophysical methods. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 20, iss. 3, pp. 307-318, DOI: 10.13031/2013.16067.

9. Karásek P., Nováková E., 2020. Agricultural Tile Drainage Detection within the Year Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Ecological Engineering*, vol. 21, iss. 4, pp. 203-211, DOI: 10.12911/22998993/119976. EDN: DGBSVD.

10. Bandurin M.A., Prikhodko I.A., Volosukhin V.A., Rudenko A.A., 2023. *Diagnostika s pomoshch'yu priborov nerazrushayushchego kontrolya zhelezobetonnoy oblitsovki i gruntovogo osnovaniya dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya damby Kryukovskogo vodokhranilishcha* [Diagnostics using non-destructive testing devices for reinforced concrete lining and soil foundation to assess the technical condition of the dam of the Kryukovskoe reservoir]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 13, no. 3, pp. 220-236, DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-220-236, EDN: GTHDRO. (In Russian).

11. Istomin A.P., Solodovnikov D.A., Istomin S.A., Kovalenko I.A., 2024. *Primenenie metodov nerazrushayushchego kontrolya dlya obsledovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Application of non-destructive testing methods for inspection of hydraulic structures]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceed. of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 1(73), pp. 381-392, DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-43, EDN: HXAPOY. (In Russian).

12. Allred B.J., Redman J.D., 2010. Location of Agricultural Drainage Pipes and Assessment of Agricultural Drainage Pipe Conditions Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 15, no. 3, pp. 119-134, DOI: 10.2113/JEEG15.3.119.

13. Allred B.J., Daniels J.J., Fausey N.R., Chen C., Peters L., Youn Jr.H., 2005. Important considerations for locating buried agricultural drainage pipe using ground penetrating radar. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 21, no. 1, DOI: 10.13031/2013.17915.

14. Becker A.M., Becker R.H., Doro K.O., 2021. Locating drainage tiles at a wetland resto-ration site within the Oak Openings region of Ohio, United States using UAV and land based geophysical techniques. *Wetlands*, vol. 41, no. 8, pp. 1-15, DOI: 10.1007/s13157-021-01495-6, EDN: IPAETJ.

Информация об авторе

Г. Б. Остапчук – научный сотрудник, кандидат экономических наук, Агрофизический научно-исследовательский институт (195220, г. Санкт-Петербург, пр-кт Гражданский, д. 14), ost@agrophys.ru, AuthorID: 1268828.

Information about the author

G. B. Ostapchuk – Researcher, Candidate of Economic Sciences, Agrophysical Research Institute ((195220, Saint-Petersburg, Grazhdansky Prospekt, 14), ost@agrophys.ru, AuthorID: 1268828.

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 21.03.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 29.09.2025.

The article was submitted 21.03.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 29.09.2025.