

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.6:528.854

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-3-67-90

Обнаружение неисправности закрытых коллекторов способом георадиолокационной съемки

Григорий Борисович Остапчук

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

Аннотация. **Цель:** апробация способа георадиолокационной съемки в полевых условиях для обнаружения неисправности закрытого коллектора и изучение зависимых факторов, влияющих на ее результативность. **Материалы и методы.** Работы выполнены на двух (исправном и неисправном) участках трассы закрытого коллектора, расположенного в границах осушенного поля Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» в Гатчинском районе Ленинградской области. В исследовании использовался георадар «ОКО-3» с антенным блоком АБ-400/900 МГц. **Результаты.** Результативность обнаружения неисправного участка коллектора указанным способом зависит от сложившихся гидрологических условий в почвенном слое, расположенном выше трубы коллектора, и содержимого полости дренажного трубопровода. Признаком неисправного коллектора (полость трубы которого полностью заполнена водой) на радарограмме является наличие локальных объектов с двойной гиперболой. В настоящем исследовании такие объекты наблюдались при уровне почвенно-грунтовых вод, расположенном в 15 см от поверхности, и не распознавались при уровне, равном 5 см. Наличие двойной гиперболы позволяет рассчитать внутренний диаметр трубы коллектора. Так, расчетный диаметр коллектора составил 267 мм при известном 300 мм. Косвенный признак неисправности коллектора – относительное понижение центральной частоты георадиолокационного профиля; относительно исправного участка коллектора такое понижение составило в среднем 8 %. **Выводы.** Преимущество георадиолокационной съемки заключается в возможности обнаружения трассы коллектора и локализации места его неисправности без использования средств механизации. Методика работ предполагает проведение георадиолокационной съемки на двух смежных участках – предполагаемом неисправном и участке ниже по течению коллектора; съемка ведется в направлении их общей границы до момента, когда локальные объекты с двойной и одинарной гиперболой обнаруживаются на минимально возможном по условиям съемки расстоянии.

Ключевые слова: закрытый коллектор, неисправность, обследование, георадар, ОКО-3, метод георадиолокации, способ неразрушающего контроля

Источник финансирования: финансирование статьи осуществлялось в рамках научных работ, выполняемых по теме государственного задания: «Развить фундаментально-прикладные основы, обосновать информационно-аналитическую базу и средства прецизионного управления агроклиматическими и агроэкологическими рисками, плодородием почв, мелиоративным, фитосанитарным состоянием и продуктивностью агроэкосистем мелиорированных земель в условиях глобальных климатических изменений» (FGEG-2025-0005).

Для цитирования: Остапчук Г. Б. Обнаружение неисправности закрытых коллекторов способом георадиолокационной съемки // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 3. С. 67–90. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-67-90>.



LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Detecting closed collector's faults using ground penetrating radar surveying

Grigory B. Ostapchuk

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

Abstract. Purpose: to test the method of ground penetrating radar surveying in the field for detecting a fault of a closed collector and to study the dependent factors influencing its efficiency. **Materials and methods.** The research was carried out on two (operational and faulty) sections of the closed collector route located within the boundaries of a drained field of the Menkovskiy branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution “Agrophysical Research Institute” in the Gatchina District of the Leningrad region. The OKO-3 ground penetrating radar with the AB-400/900 MHz antenna unit was used. **Results.** The efficiency of detecting the collector's faulty section using this method depends on the prevailing hydrological conditions in the soil layer located above the collector pipe and the contents of the drainage pipeline cavity. A sign of a faulty collector (the pipe cavity of which is completely filled with water) on the radargram is the presence of local objects with a double hyperbola. In this study, such objects were observed at a groundwater level of 15 cm from the surface and were not recognized at a level of 5 cm. The presence of a double hyperbola allows us to calculate the internal diameter of the collector pipe. Thus, the calculated collector diameter was 267 mm with a known value of 300 mm. An indirect indicator of collector failure is a relative decrease in the central frequency of the ground penetrating radar profile; relative to the collector's operational section, this decrease averaged 8 %. **Conclusions.** The advantage of ground penetrating radar surveying is the ability to detect the collector route and localize the fault location without the use of mechanization. The work methodology involves conducting a ground penetrating radar surveying in two adjacent sections – the suspected faulty section and the section downstream of the collector; the survey is conducted in the direction of their common boundary until local objects with a double and single hyperbola are detected at the minimum possible distance under the survey.

Keywords: closed collector, faults, inspection, ground penetrating radar, OKO-3, ground penetrating radar method, non-destructive testing method

Funding source: the article was funded within the state assignment: “To develop fundamental and applied basis, substantiate the information and analytical base and means of precision management of agroclimatic and agroecological risks, soil fertility, reclamation, phytosanitary condition and productivity of agroecosystems of reclaimed lands under global climate change” (FGEG-2025-0005).

For citation: Ostapchuk G. B. Detecting closed collector's faults using ground penetrating radar surveying. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(3):67–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-67-90>.

Введение. Возникновение препятствия (неисправности) в трубопроводе закрытого коллектора может приводить к нарушению его водопроводящей функции. К таким препятствиям следует отнести корневую пробку, разрушение или значительное смещение трубки коллектора с концентрацией в указанном месте минерального наилка, вызывающие подпор дренажных вод.

В связи с этим под неисправным участком закрытого коллектора в настоящей работе понимается такой участок его трубопровода, полость которого полностью заполнена водой. В зависимости от месторасположения неисправности – недалеко от устья или на остальной части трубопровода коллектора – вопрос ее обнаружения может быть решен различными способами.

Существующие способы обнаружения неисправности закрытых коллекторов. Традиционная технология определения технического состояния закрытых коллекторов предусматривает работы по обнаружению их трасс механизированными средствами, вскрытие и определение технического состояния коллектора в месте шурфа^{1,2}. Аналогичные работы проводятся при промывке закрытых коллекторов, но с той лишь разницей, что место неисправности устанавливается при выявлении препятствия к продвижению по трубопроводу коллектора рабочей насадки дренапромывочного оборудования [1].

Близки по принципу обнаружения неисправности к последнему способу телеинспекция [2]³ и использование радиозонда [3]. Однако глубина проникновения технического эндоскопа в трубопровод коллектора, по нашим наблюдениям, зависит от его диаметра и типа материала, а также наличия смещений трубок. Кроме того, возможность получения видеосигнала зависит от типа и состояния содержимого полости коллектора.

В условиях отсутствия средств механизации поиск неисправного участка закрытого коллектора может осуществляться путем устройства на его трассе временных скважин с замером в них уровня почвенно-грун-

¹Бишоф Э. А., Даишев Т. И., Климко А. И. Методические указания по проведению наблюдений за мелиоративным состоянием осушенных земель. Л.: СевНИИГиМ, 1972. 154 с.

²Руководство по мелиорации полей / Г. Г. Гулюк, Ю. Г. Янко, В. И. Штыков, М. Б. Черняк, А. Ф. Петрушин. СПб.: АФИ, 2020. 217 с. DOI: 10.25695/k9292-1099-3543-i. EDN: MBGJQS.

³См. рисунок 5с в работе [2] и комментарии к нему.

товых вод. Сюда же следует отнести и проколы поисковым щупом почвы вдоль трассы коллектора с выявлением наличия воды¹.

Обособленно следует поставить камеральный способ обнаружения неисправного участка закрытого коллектора. Данный способ подразумевает картирование по высокодетальным космическим снимкам трасс закрытых коллекторов и расположенных над ними вымочек сельскохозяйственных культур [4]. Результативность способа зависит от наличия соответствующих дешифровочных признаков, при этом результатом является не столько локализованное месторасположение неисправности, сколько участок трассы коллектора с подпором дренажных вод.

Все перечисленные способы обнаружения неисправности закрытого коллектора объединяет необходимость до начала проведения работ наличия сведений о точном местоположении его трассы. Поэтому на участках трассы закрытого коллектора, за исключением устьевого и недалеко от смотровых колодцев, требуется проведение работ по установлению ее местоположения [5] механизированным или геодезическим способами. Стремление к сокращению указанных работ ведет к поиску новых альтернативных способов обнаружения неисправности закрытых коллекторов. К такому способу следует отнести георадиолокационную съемку [2].

Вопросы применения способа георадиолокационной (георадарной) съемки применительно к закрытым дренажным системам широко рассмотрены на примере решения задачи по их обнаружению и картированию [2, 6, 7]. В то же время вопросы определения технического состояния закрытого дренажа указанным способом в настоящее время остаются наиболее детально освещенными на примерах моделирования волнового рисунка георадиолокационных профилей для различного технического состояния дренажа в контексте интерпретации опытных данных [8].

Цель настоящего исследования – апробация способа георадиолокационной съемки в полевых условиях для обнаружения неисправности за-

крытого коллектора, а также изучение зависимых факторов, влияющих на ее результативность.

Материалы и методы. *Объект обследования.* Работы по локализации неисправности закрытого коллектора способом георадиолокационной съемки выполнены на примере двух (исправного и неисправного) участков трассы закрытого коллектора МЗК-1 (коллектор), расположенного в границах поля № 19 Меньковского филиала ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» в Гатчинском районе Ленинградской области; географические координаты участка работ: 59°24'39" с. ш., 30°00'31" в. д.

Коллектор построен в 1970 г.; на участке работ он представлен железобетонным трубопроводом с внутренним диаметром 300 мм (рисунок 1). Трасса коллектора в указанном месте проходит по тальвегу ложбины и ограничена двумя смотровыми колодцами, расположенными на расстоянии 190 м друг от друга. Первый смотровой колодец СК-9 расположен ниже по течению коллектора в границах застройки сельского населенного пункта, а второй – СК-8 – выше – в поле (рисунок 2). По данным обследования указанных смотровых колодцев, в 2022 и 2023 гг. подпор воды в коллекторе отсутствовал. Обследование, проведенное 4 июня 2025 г., выявило наличие в смотровом колодце СК-8 подпора коллектора – уровень воды стоял выше верха его трубы; в смотровом колодце СК-9 водопроводящая функция коллектора была сохранена, подпор отсутствовал (см. рисунок 1); одновременно на участке трассы коллектора между указанными смотровыми колодцами было обнаружено выклинивание дренажных вод на поверхность (см. рисунок 2, ср. с более ранним снимком, представленным на рисунке 5а).

Соответственно сложившейся обстановке, участки георадиолокационной съемки были спланированы таким образом, чтобы исправный участок коллектора примыкал к смотровому колодцу СК-9, а неисправный – к смотровому колодцу СК-8 (см. рисунок 2). Почвы на указанных участках, по данным работ по устройству временных скважин, имеют легкий гранулометрический состав – от супесчаного до легкосуглинистого.



a – общий вид смотрового колодца СК-8; *b* – смотровой колодец СК-8 (уровень воды выше верха трубы коллектора), 04.06.2025; *c* – смотровой колодец СК-8 (сразу после сброса воды), 23.07.2025; *d* – общий вид смотрового колодца СК-9; *e* – трубопровод коллектора в СК-9; *f* – трубопровод коллектора в СК-9 (полость трубы)

a – general view of inspection well SK-8; *b* – inspection well SK-8 (water level above the top of the collector pipe), 04.06.2025; *c* – inspection well SK-8 (immediately after water discharge), 23.07.2025; *d* – general view of inspection well SK-9; *e* – collector pipeline in SK-9; *f* – collector pipeline in SK-9 (pipe cavity)

Примечание – Вершиной треугольника обозначена труба коллектора в смотровом колодце, относящаяся к соответствующим: исправному и неисправному – участкам георадиолокационной съемки.

Note – the apex of the triangle indicates the collector pipe in the observation well, relating to the corresponding GPR survey sections: operational and faulty.

Рисунок 1 – Техническое состояние коллектора в смотровых колодцах в период проведения георадарной съемки (автор фото Г. Б. Остапчук)

Figure 1 – Technical condition of the collector in the observation wells during the GPR survey (photo by G. B. Ostapchuk)



Штриховая линия – трасса коллектора; кружки – смотровые колодцы; прямоугольники и цифры в кружках – участки георадиолокационной съемки и их номера (№ 1 – исправный участок коллектора и № 2 – неисправный участок коллектора); вершина треугольника – место выклинивания дренажных вод на поверхность

The dashed line is the collector route; the circles are the inspection wells; the rectangles and numbers in the circles are the GPR surveying sites and their numbers (no. 1 is the operational section of the collector and no. 2 is the faulty section); the apex of the triangle is the point where drainage water emerges at the surface

Рисунок 2 – Участки георадиолокационной съемки

Figure 2 – GPR surveying sites

Глубина верха трубы коллектора, измеренная в смотровых колодцах, составила: в СК-9 – 1,2 м, в СК-8 – 1,3 м.

Оборудование и методика работ. В исследовании использовался двух-частотный георадар-моноблок «ОКО-3» с антенным блоком АБ-400/900 МГц, перемещаемый на салазках. Георадиолокационная съемка проводилась по методике, представленной нами ранее в работе [2], на частоте 400 МГц с разверткой 100 нс. На неисправном участке трассы закрытого коллектора были устроены временные скважины для оценки уровня почвенно-грунтовых вод. Обработка и анализ радарограмм осуществлялись при помощи специализированного программного обеспечения CartScan. Составление план-схем выполнено посредством программного обеспечения – в географической информационной системе с открытым кодом QGIS.

Результаты и обсуждение. *Признак неисправности закрытого коллектора на радарограмме.* Одной из ключевых характеристик, влияющих на положение во временном (глубинном) аспекте локального объекта⁴ на волновой картине георадиолокационного профиля (радарограмме), является скорость распространения электромагнитной волны в среде, описываемая формулой:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (1)$$

где V – скорость распространения электромагнитной волны в среде, см/нс;

c – скорость света, м/с;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды⁵.

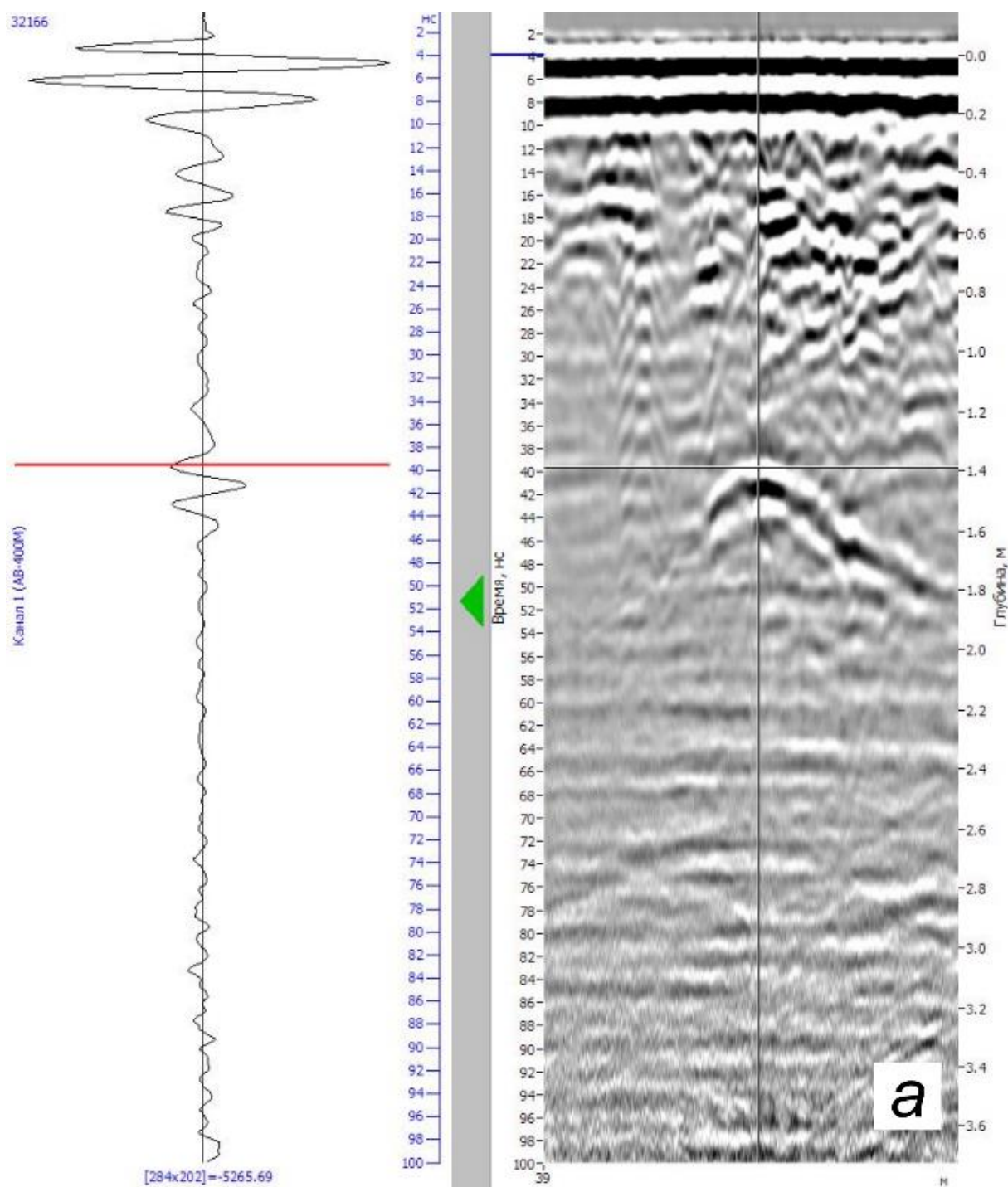
Известно, что величина относительной диэлектрической проницаемости для различных веществ принимает следующие значения: для воздуха – 1, воды – 81, песка сухого – 4–7, песка влажного – 5–15⁵, керамики – 3–7 [2, 6]. Соответственно, в зависимости от содержимого трубки коллектора, и в частности воздуха или воды, скорость распространения электромагнитной волны в ее полости многократно меняется. Это явление, в случае если трубка полностью заполнена водою, приводит к фиксации на радарограмме двух границ. Первая – граница между придренным слоем почвы над дренажной трубкой и водой в полости трубки⁶, а вторая – граница между водой в полости трубки и придренным слоем почвы под дренажной трубкой. Таким образом, в отличие от исправного участка трубопровода закрытого коллектора (с воздушной полостью в его трубе), представленного на радарограмме локальным объектом с одинарной (верхней) гиперболой [2],

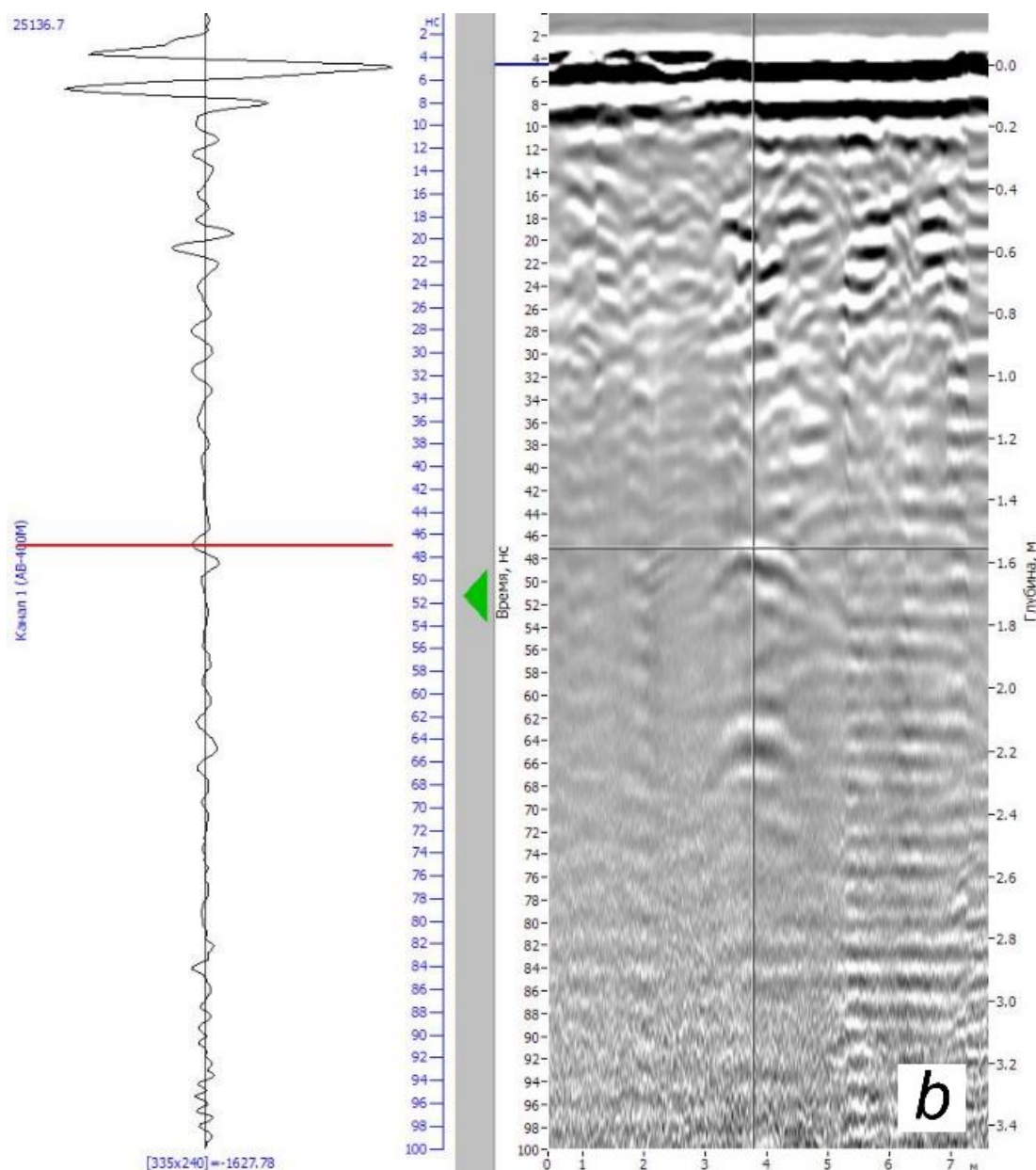
⁴Под локальным объектом в настоящей работе понимается признак закрытого дренажа на радарограмме, представленный одинарной или двойной гиперболой.

⁵Владов М. Л., Судакова М. С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учеб. пособие. М.: ГЕОС, 2017. 236 с.

⁶Стенка трубки оказывает незначительное влияние на волновой рисунок закрытого дренажа на радарограмме [8].

неисправный участок коллектора (с полностью заполненной водой трубой) представлен на радарограмме локальным объектом с двойной гиперболой – верхней и нижней – от обеих указанных границ [8, 9] (рисунок 3).





a – исправный участок трубопровода коллектора;
b – неисправный участок трубопровода коллектора
(полость трубы коллектора полностью заполнена водой)

a – operational section of the collector pipeline; *b* – faulty section of the collector pipeline (the collector pipe cavity is completely filled with water)

Примечание – внутренний диаметр коллектора 300 мм, степень заилиения 0 %; на обоих рисунках одинаковая степень усиления амплитуды сигнала.

Note – the internal collector diameter is 300 mm, the siltation degree is 0 %; in both figures the degree of signal amplitude amplification is the same.

Рисунок 3 – Признак исправного и неисправного состояния трубопровода коллектора на радарограмме (автор радарограммы Г. Б. Остапчук)

Figure 3 – Indicators of operational and faulty collector's pipeline conditions on the radargram (the radargram author G. B. Ostapchuk)

Следует отметить, что наличие у локального объекта на неисправном участке коллектора двух гипербол позволяет на основе сведений о времени прихода сигнала, отраженного от обеих вершин гипербол, и скорости электромагнитной волны в воде рассчитать расстояние между указанными границами, т. е. в рассматриваемом случае – внутренний диаметр трубопровода коллектора [9].

Ко второму признаку неисправного состояния закрытых дренажных трубопроводов на радарограмме следует отнести смену фазы электромагнитной волны при прохождении ею границы раздела двух сред, имеющих соответственно меньшее и большее значение величины относительной диэлектрической проницаемости. Количественно и качественно указанный признак описывается коэффициентом отражения, который рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{почв}}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{сод.тр.}}}}{\sqrt{\varepsilon_{\text{почв}}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{сод.тр.}}}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент отражения электромагнитной волны;

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

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

Смена фазы электромагнитной волны соответствует отрицательным значениям коэффициента отражения⁵ [6]. Из представленных выше значений величины относительной диэлектрической проницаемости видно, что на неисправном участке коллектора отрицательное значение указанного коэффициента следует наблюдать на границе между придренным слоем почвы и водой в полости трубки коллектора (при условии ее полного заполнения).

Кроме описанных признаков неисправного состояния закрытого дренажа данные георадиолокационной съемки позволяют на основе атрибутивного анализа выявить участок с более влагонасыщенным состоянием почвенного слоя. Для этого анализируется частота, соответствующая максимуму амплитудно-частотного спектра сигнала (спектральная частота) георадиолокационного профиля⁷. Известно, что при повышении влажности почвенного слоя центральная частота понижается^{5, 8} [10]. Таким образом, более низкое значение центральной частоты на одном из двух участков съемки коллектора может указывать на повышенную влажность почвы, вызванную его неисправностью.

Результаты георадиолокационной съемки коллектора. План-схемы и фотографии участков съемки коллектора представлены на рисунке 4.

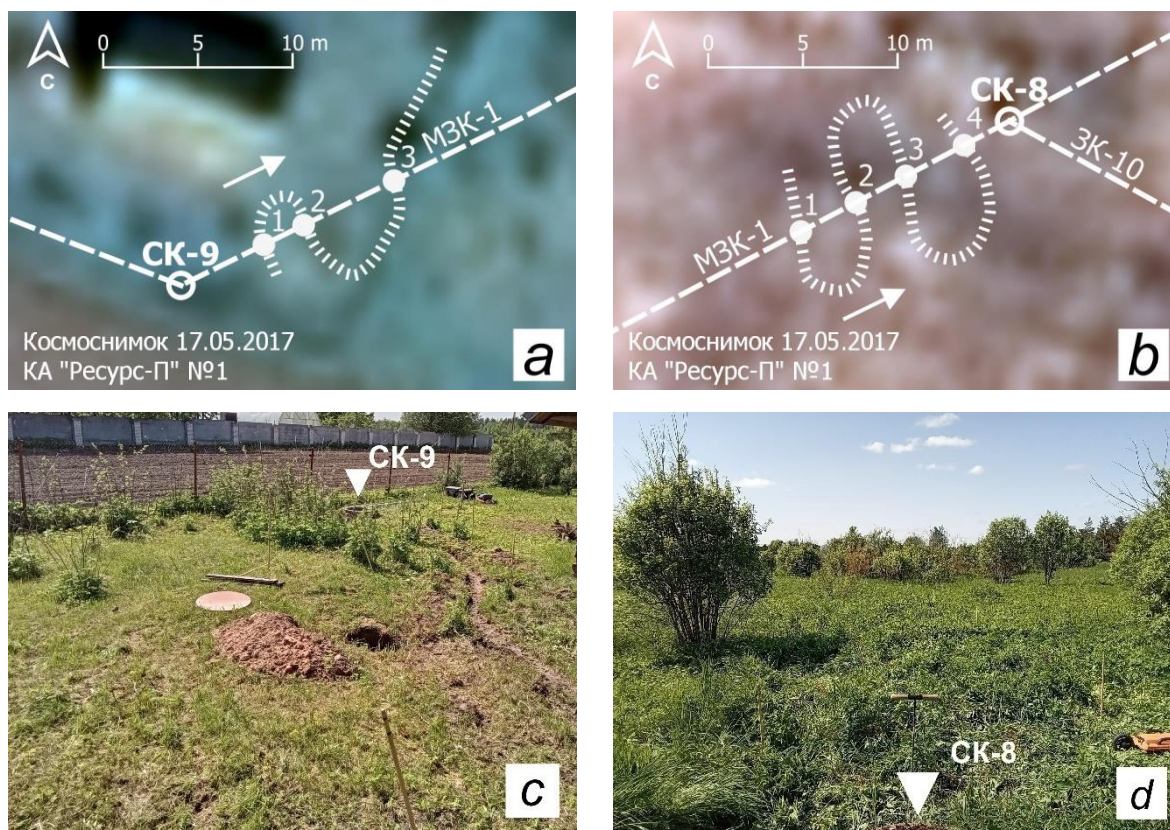
Запроектированная в камеральных условиях линия георадиолокационного профиля была скорректирована на местности соответственно фактической обстановке. В частности, на участке съемки недалеко от смотрового колодца СК-9 необходимость коррекции была обусловлена наличием объектов кустарниковой растительности, а на участке, примыкающем к смотровому колодцу СК-8, – древесно-кустарниковой растительности и зеркала поверхностных вод по краю⁹.

Фрагменты радарограмм, полученных на обоих съемочных участках, представлены на рисунке 5.

⁷ГОСТ Р 72316-2025. Дороги автомобильные общего пользования. Земляное полотно. Георадиолокационные методы обследования. Введ. 2025-12-01. М.: РСТ, 2025. 40 с.

⁸Термины «спектральная частота» и «центральная частота» применительно к георадиолокационному профилю используются как синонимы.

⁹В связи с тем, что датчик перемещения георадара – одометр водопроницаем, наличие зеркала поверхностных вод или влаги на высокой травянистой растительности ограничивает использование прибора.



Зигзагообразная штриховая линия – линия георадиолокационного профиля на местности (траектория движения георадара); точки – местоположение выявленных на радарограмме локальных объектов с указанием их номера; кружки – смотровые колодцы; вершина треугольника на фотографиях – местоположение смотрового колодца.

a и *c* – план-схема съемки исправного участка коллектора и фотография участка (вид с позиции точки 2 в сторону СК-9), 04.06.2025; *b* и *d* – план-схема съемки неисправного участка коллектора и фотография участка (вид от СК-8 на участок), 04.06.2025

The zigzag dashed line is the ground penetrating radar profile line on the ground (the ground penetrating radar trajectory); the dots are the locations of local objects detected on the radargram, with their numbers indicated; the circles are manholes; the apex of the triangle in the photographs is the location of the manhole.

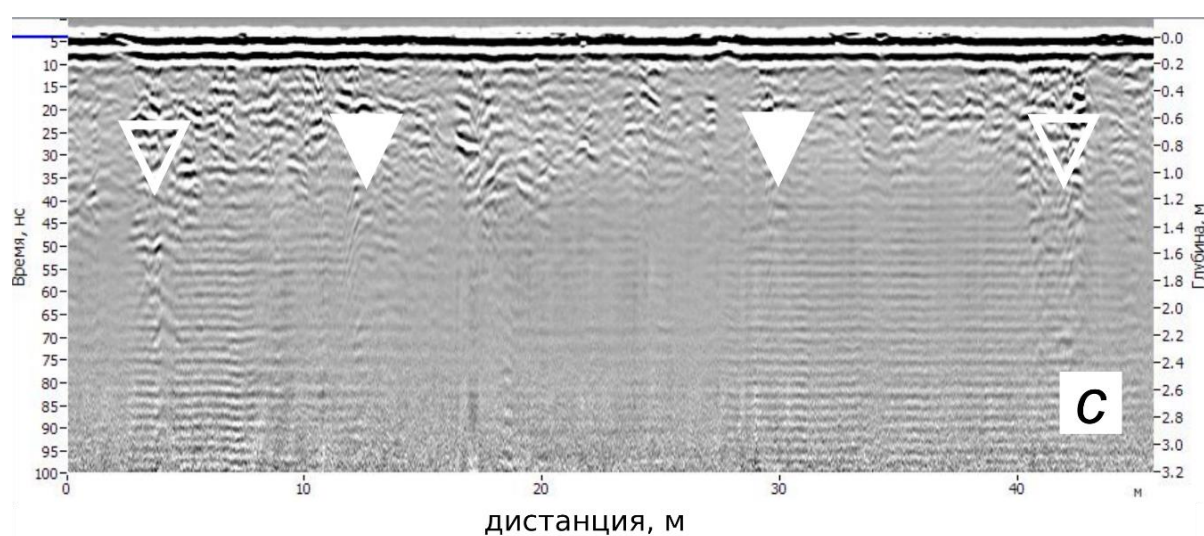
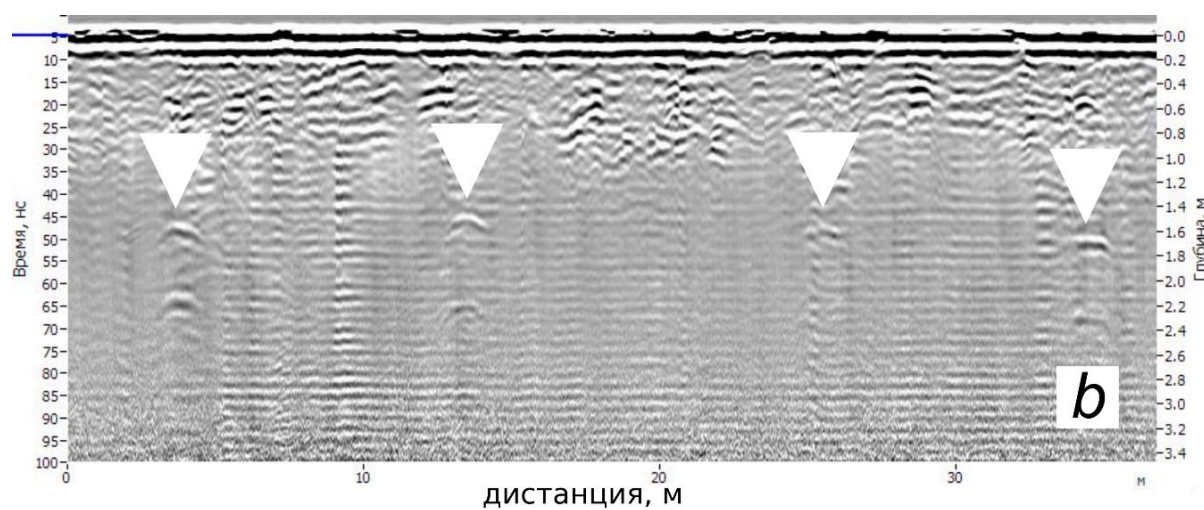
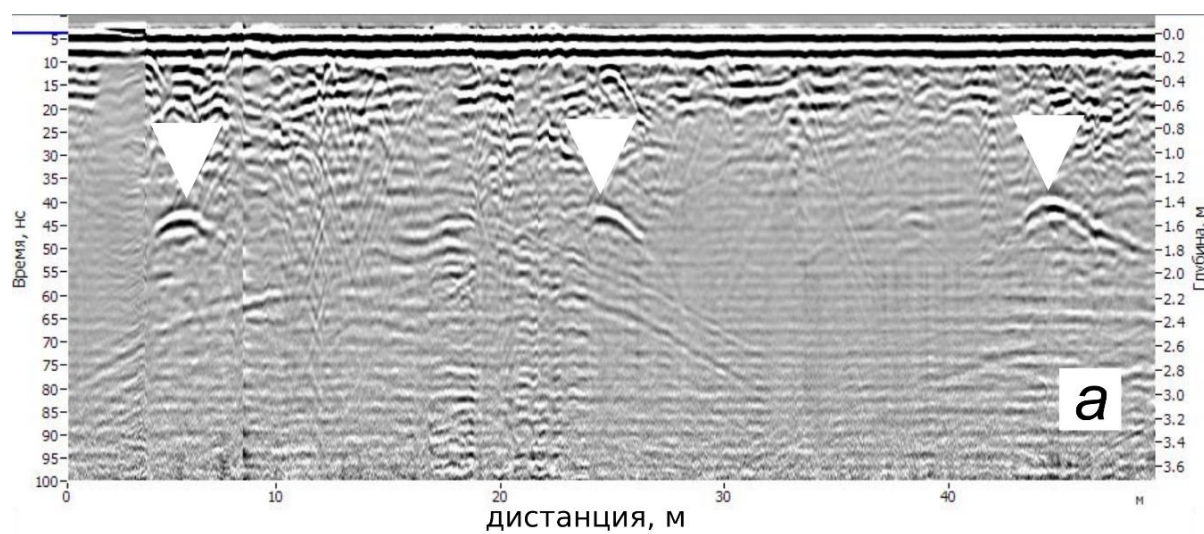
a and *c* – the layout of the collector's operational site and a site's photograph (view from point 2 towards SK-9), 04.06.2025; *b* and *d* – the layout of the faulty section of the collector and a photograph of the section (view from SK-8 towards the section), 04.06.2025

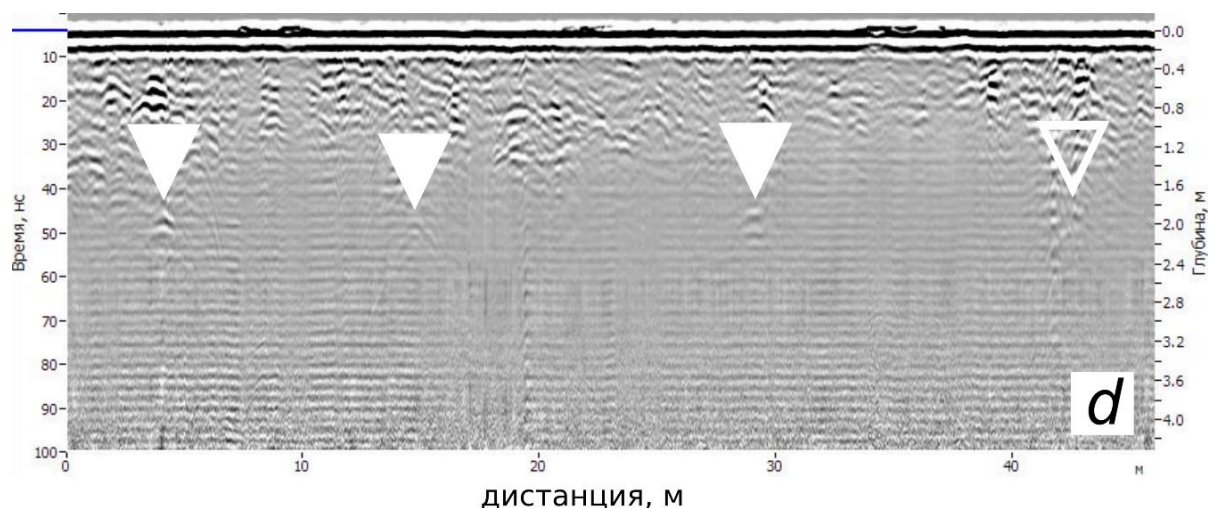
Примечание – линии георадиолокационных профилей на обоих участках съемки, выполненной в разное время, аналогичны представленным.

Note – the lines of the ground penetrating radar profiles in both survey areas, carried out at different times, are similar to those shown.

Рисунок 4 – План-схемы участков георадиолокационной съемки (автор фото и радарограмм Г. Б. Остапчук)

Figure 4 – Layouts of ground penetrating radar surveying sections (photo and radargrams' by G. B. Ostapchuk)





Вершина треугольника со сплошной заливкой – местоположение выявленного локального объекта; вершина треугольника-контура – предполагаемое местоположение локального объекта.

a – исправный участок коллектора, 4 июня 2025 г.; *b* – неисправный участок коллектора, 4 июня 2025 г.; *c* – неисправный участок коллектора, 2 июля 2025 г.; *d* – неисправный участок коллектора, 23 июля 2025 г. (сразу после сброса воды)

The apex of the solid triangle is the location of the detected local object; the apex of the outline triangle is the estimated location of the local object.

a – the operational collector's section, June 4, 2025; *b* – the faulty collector's site, June 4, 2025; *c* – the faulty collector's section, July 2, 2025; *d* – the faulty collector's section, July 23, 2025 (immediately after the water discharge)

Примечание – на всех рисунках одинаковая степень усиления амплитуды сигнала и контраста; изображения третьего слева локального объекта на рисунке 5а и первого слева на рисунке 5b представлены крупным планом на рисунке 3.

Note – there is the same degree of signal amplitude and contrast enhancement on all pictures; the images of the third local object from the left in Figure 5a and the first from the left in Figure 5b are shown in close-up in Figure 3.

Рисунок 5 – Фрагменты радарограмм исправного и неисправного участков коллектора (автор радарограмм Г. Б. Остапчук)

Figure 5 – Fragments of radargrams of the operating and faulty collector's sites (radargrams' author G. B. Ostapchuk)

Анализ волнового рисунка локальных объектов. Как видно, трубопровод коллектора, находящийся в исправном состоянии, представлен на радарограмме локальными объектами в виде одинарной гиперболы. В то же время неисправный участок трассы коллектора в зависимости от времени съемки и технического состояния коллектора определяется на радарограмме локальными объектами, имеющими различный волновой рисунок, или отсутствием таких локальных объектов. Так, на радарограмме от 4 июня

(рисунок 5b) локальные объекты представлены двойной гиперболой, тогда как на радарограмме от 2 июля (рисунок 5c) локальные объекты отсутствовали или были обнаружены только следы от верхней гиперболы. Кроме того, сравнительный анализ радарограмм, переставленных на рисунках 5a и 5b, обнаруживает более высокую четкость локальных объектов на исправном участке коллектора.

Для интерпретации результатов съемки, полученных на неисправном участке коллектора, были привлечены данные замера уровня почвенно-грунтовых вод. Так, известно, что 4 июня уровень почвенно-грунтовых вод был на отметке 15 см от поверхности земли, а 2 июля – 5 см. Поэтому отсутствие у локального объекта на радарограмме 2 июля ветвей гипербол может быть объяснено следующим образом. Наличие ветвей гипербол (дифрагированной волны) у локального объекта обусловлено диаграммой направленности антенны георадара. В связи с этим начало формирования волнового рисунка одной из ветвей гиперболы происходит в момент, когда георадар находится на большем расстоянии (в стороне) от объекта съемки¹⁰. Так как с повышением влажности почвы проникающая способность сигнала георадара снижается^{11, 12}, вместе с увеличением расстояния это приводит к ослаблению сигнала и соответственно исчезновению ветвей гипербол

¹⁰Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (георадар) «ОКО-3». Универсальный базовый комплект. Техническое описание. Инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: https://www.geotech.ru/images/georadary/teh_opisanie_na_oko3_ot_17-10-18.pdf (дата обращения: 07.04.2026).

¹¹Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.

¹²В обоих случаях в трубе коллектора присутствовала вода: на исправном участке – в объеме нормального функционирования коллектора (см. рисунок 1f), а на неисправном – в объеме полного сечения трубы коллектора, что могло оказать влияние на структуру сигнала, так же как и толщина стенки трубы коллектора 40 мм. В работе [8] представлены рисунки, моделирующие различные состояния дренажа на радарограммах. Так, сравнение рисунка 9a, на котором представлен локальный объект, соответствующий порожней дренажной трубке, с рисунком 9b, представляющим ту же трубку, но на 2/3 заполненную влажным наилком, выявляет изменения в структуре сигнала – снижение четкости верхней части сигнала гиперболы.

у локального объекта. Из этого следует, что отсутствие на радарограмме каких-либо признаков локальных объектов на известном участке трассы коллектора при одновременном наличии локальных объектов, представленных одинарными гиперболами, ниже по течению коллектора может также являться признаком неисправного состояния коллектора.

Радарограмма от 23 июля (рисунок 5d) получена сразу после устранения неисправности коллектора и сброса напора воды в его трубопроводе. Как видно, создание воздушной полости в трубопроводе коллектора при неизменном влагонасыщенном состоянии почвенного слоя выше коллектора привело к частичному усилению отклика от трубы коллектора, представленному локальными объектами с одинарной гиперболой.

Анализ структуры сигнала локальных объектов. Анализ фрагментов радарограмм исправного и неисправного участков коллектора (см. рисунок 3) показывает, что смена фазы электромагнитной волны у сравниваемых гипербола отсутствует. Так, видно, что четкое формирование волнового рисунка гипербола как на исправном, так и на неисправном (верхняя гипербола) участке коллектора начинается с отрицательной фазы¹². В связи с этим диагностирование состояния коллектора по данному признаку затруднено.

Анализ спектральной частоты георадиолокационных профилей. Данные о спектральной частоте георадиолокационных профилей, полученной для обоих участков съемки, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Спектральная частота георадиолокационных профилей, полученных на исправном и неисправном участках коллектора

Table 1 – Spectral frequency of ground penetrating radar profiles obtained on operational and faulty collector's sections

Дата	Участок трассы коллектора	
	исправный	неисправный
4 июня	310	269
2 июля	Съемка не проводилась	278
23 июля	301	292
Среднее	306	280

Как видно, во всех случаях на неисправном участке коллектора значение спектральной частоты ниже, чем на исправном; в среднем снижение частоты на неисправном участке составило 8 %. Это указывает на более высокую влажность почвенного слоя на неисправном участке коллектора.

Расчет диаметра трубопровода коллектора. Расчет глубины внутреннего диаметра трубы коллектора на неисправном участке выполнен на примере второго локального объекта (см. рисунок 3b). Как видно, расстояние по времени между вершинами верхней и нижней гипербола составляет 8 нс¹³, соответственно, расчетное значение внутреннего диаметра коллектора, исходя из того, что его полость полностью заполнена водой, по представленной ранее формуле составляет 267 мм.

Комплекс признаков нарушения водопроводящей функции коллектора на радарограммах. Проведенное исследование позволяет выделить комплекс признаков на радарограммах, фиксирующих нарушение водопроводящей функции коллектора (таблица 2).

Таблица 2 – Комплекс признаков нарушения водопроводящей функции коллектора на радарограммах, полученных на смежных съемочных участках

Table 2 – Complex of features of a violation of the collector's water-conducting function on radargrams obtained at adjacent survey sites

Номер съемки	Номер участка съемки	Выявленный на радарограмме признак коллектора			Техническое состояние коллектора
		Одинарная гипербола	Двойная гипербола	Отсутствие признаков	
1	2	3	4	5	6
1	Участок № 1	Есть	Отсутствует	Отсутствует	Водопроводящая функция сохранена
	Участок № 2	Есть	Отсутствует	Отсутствует	
2	Участок № 1	Есть	Отсутствует	Отсутствует	Водопроводящая функция нарушена
	Участок № 2	Отсутствует	Есть	Отсутствует	

¹³1/2 времени прохождения сигнала в направлении туда и обратно на отрезке между вершинами гипербола, равного 16 нс (отсчеты 46 и 62 нс).

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

1	2	3	4	5	6
3	Участок № 1	Есть	Отсутствует	Отсутствует	Водопродо- водящая функ- ция нарушена
	Участок № 2	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	
Примечание – Для гидрологических условий проведения съемки, характеризуемых формированием в коллекторе дренажного стока.					

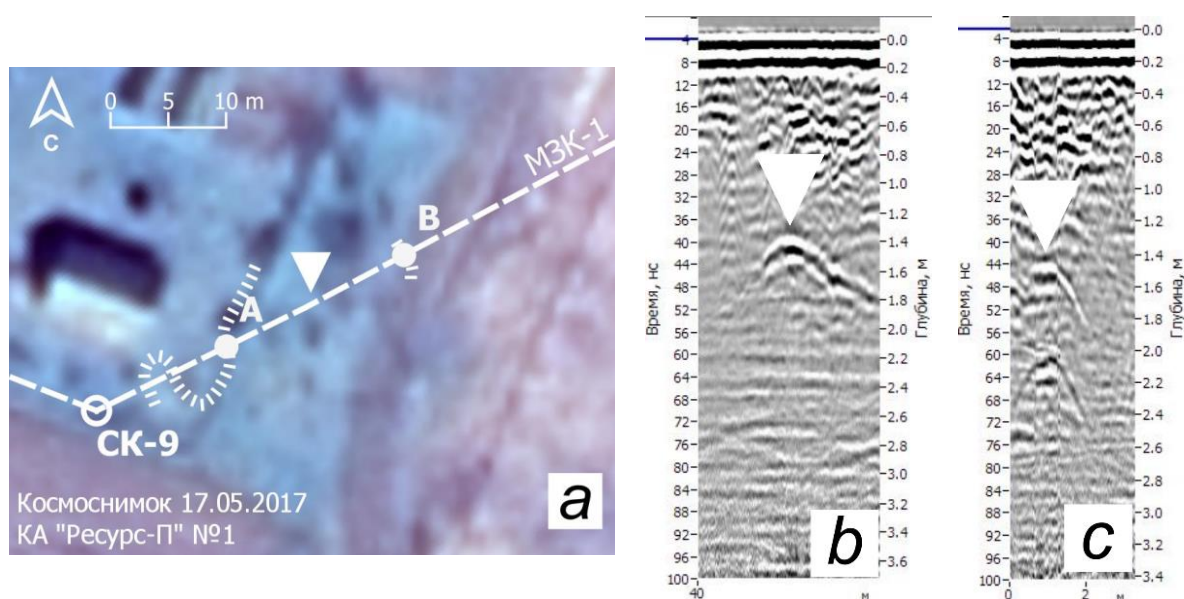
Как видно, нарушение водопродводящей функции коллектора в усло-
виях формирования дренажного стока может быть установлено способом
георадиолокационной съемки по комплексу из двух признаков, представ-
ленных на радарограммах: наличию на одном из участков съемки одинар-
ных гипербола при выявлении на втором участке съемки двойных гипербола
или отсутствию на нем гипербола обоих видов.

В ситуации, когда на втором участке съемки в месте прохождения
трассы коллектора на радарограмме не обнаружены признаки закрытого
дренажа, косвенным подтверждением нарушения водопродводящей функ-
ции коллектора может выступать снижение на таком участке спектральной
частоты георадиолокационного профиля.

Локализация неисправности коллектора. Для выявления места воз-
никновения неисправности коллектора георадиолокационная съемка была
проведена на двух участках – предполагаемом неисправном и участке ниже
по течению коллектора. Результаты работ по локализации неисправности
коллектора представлены на рисунке 6.

Как видно, на радарограмме, полученной на предполагаемом неис-
правном участке коллектора, была обнаружена двойная гипербола, тогда
как на участке ниже по течению – одинарная. Согласно представленному
комплексу признаков это указывает на нарушение водопродводящей функ-
ции коллектора. Соответственно, неисправность (препятствия), создающая

подпор дренажных вод в коллекторе, находится между указанными точками трассы коллектора¹⁴.



Вершина треугольника с литерами – местоположение обнаруженных локальных объектов с одинарной (А) и двойной гиперболой (В); вершина треугольника на план-схеме – место неисправности коллектора.

a – план-схема участков съемки при локализации неисправности коллектора, 4 июня 2025 г.; *b* – фрагмент радарограммы с признаком исправного состояния коллектора в точке А, обозначенной на план-схеме; *c* – радарограмма с признаком неисправного состояния коллектора в точке В, обозначенной на план-схеме

The apex of the triangle with letters is the location of the detected local objects with a single (A) and double hyperbola (B); the apex of the triangle on the layout is the location of the collector fault.

a – layout of the survey areas at collector fault localization, June 4, 2025; *b* – radargram fragment with an indicator of the collector's operational condition at point A, indicated on the layout; *c* – radargram with an indicator of the collector's faulty condition at point B, indicated on the layout

Рисунок 6 – Локализация места неисправности коллектора способом георадиолокационной съемки (автор радарограмм Г. Б. Остапчук)
Figure 6 – Localization of the collector's fault location using a ground penetrating radar surveying (radargrams' author G. B. Ostapchuk)

Выводы

1 Основное преимущество обнаружения неисправности закрытого коллектора способом георадиолокационной съемки заключается в возмож-

¹⁴Причина неисправности коллектора, установленная в ходе ремонта, – плотная корневая пробка, заполнившая весь внутренний диаметр трубы коллектора, со скоплением в указанном месте минерального наила. Неисправность расположена недалеко от посадки дуба в 22 м от смотрового колодца СК-9 (см. рисунок 6а).

ности решения одновременно двух задач: а) обнаружение трассы коллектора; б) выявление неисправности коллектора без использования средств механизации или геодезических способов.

2 Признак неисправного состояния закрытого коллектора на радарограмме (труба заполнена водой на всю ее площадь сечения) представляет собой волновой рисунок локального объекта, имеющий двойную (верхнюю и нижнюю) гиперболу.

3 Выраженность ветвей двойных гипербол зависит от гидрологических условий, сложившихся на момент съемки в почвенном слое, расположенном выше трубы коллектора. В настоящем исследовании на неисправном участке коллектора локальные объекты с двойной гиперболой наблюдались в условиях, когда уровень почвенно-грунтовых вод на участке съемки находился не выше 15 см от поверхности. При уровне грунтовых вод 5 см от поверхности локальные объекты во время полевых работ на радарограмме не распознавались; последующая камеральная обработка выявила лишь следы верхних гипербол локальных объектов.

4 Нарушение водопрводящей функции коллектора в условиях формирования дренажного стока может быть установлено способом георадиолокационной съемки по комплексу из двух признаков, представленных на радарограммах: наличию на одном из участков съемки одинарных гипербол при выявлении на втором участке съемки двойных гипербол или отсутствию на нем гипербол обоих видов.

5 Локализация места неисправности (препятствия) в трубопроводе коллектора предполагает проведение георадиолокационной съемки на двух смежных участках – предполагаемом неисправном и участке ниже по течению коллектора. Съемка ведется в направлении общей границы участков до момента, когда оба типа локальных объектов обнаруживаются на минимально возможном по условиям съемки расстоянии, по возможности обеспечивающем проведение ремонтных работ.

6 Косвенным диагностическим признаком неисправного технического состояния коллектора является понижение центральной частоты георадиолокационного профиля на участке с относительно более высоким влагонасыщенным состоянием придренного слоя почвы. Для условий выполненных съемок такое понижение на неисправном участке коллектора сравнительно с исправным участком составило в среднем 8 %.

7 Наличие на радарограмме, полученной при съемке неисправного участка закрытого коллектора, локального объекта с двойной гиперболой позволяет определить внутренний диаметр его трубы. В проведенном исследовании расчетный диаметр коллектора составил 267 мм при известном фактическом 300 мм.

Список источников

1. Рекомендации по восстановлению работоспособности закрытого дренажа осушительных систем / Н. Н. Дубенок, А. И. Иванов, Ю. Г. Янко, А. Ф. Петрушин, В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, В. Е. Молитвин; под общ. ред. Н. Н. Дубенка [и др.]. СПб.: АФИ, 2025. 69 с. EDN: RLTMGM.
2. Остапчук Г. Б. Методические вопросы обнаружения и картирования закрытых коллекторов осушительных мелиоративных систем способом георадарной съемки // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 3. С. 67–90. DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-67-90. EDN: JTQRZU.
3. Рекомендации по техническому обслуживанию закрытого дренажа и очистке водопропускных сооружений на открытой регулирующей сети с применением новых способов и технологий / А. С. Анженков, Н. Н. Погодин, В. А. Болбышко, Г. Ю. Левин, В. П. Закржевский; Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по земледелию, Ин-т мелиорации. Минск: Ин-т мелиорации, 2019. 66 с. EDN: YTEXPF.
4. Остапчук Г. Б. Картирование и типизация вымочек сельскохозяйственных культур на основе данных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения // Природообустройство. 2025. № 5. С. 15–22. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-5-15-22. EDN: GUOKIG.
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. 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, H. Youn // Applied Engineering in Agriculture. 2005. 21(1). P. 71–87. DOI: 10.13031/2013.17915.
7. 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, № 8. P. 1–15. DOI: 10.1007/s13157-021-01495-6. EDN: IPAETJ.
8. Allred B., 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. 15(3). P. 119–134. DOI: 10.2113/JEEG15.3.119.

9. Mapping of agricultural subsurface drainage systems using unmanned aerial vehicle imagery and ground penetrating radar / T. Koganti, E. Ghane, L. R. Martinez, B. V. Iversen, B. J. Allred // *Sensors* (Basel). 2021, Apr. 15. Vol. 21, № 8. 2800. DOI: 10.3390/s21082800. EDN: YUBSFG.

10. Методические подходы к обнаружению ослабленных зон в дорожной одежде по динамическим и кинематическим признакам / А. М. Кулижников, Р. А. Еремин, Н. Г. Пудова, Е. О. Зверев // *Дороги и мосты*. 2022. № 2(48). С. 82–97. EDN: GJGXMO.

References

1. Dubenok N.N., Ivanov A.I., Yanko Yu.G., Petrushin A.F., Shtykov V.I., Ponomarev A.B., Molitvin V.E., 2025. *Rekomendatsii po vosstanovleniyu rabotosposobnosti zakrytogo drenazha osushitel'nykh sistem* [Recommendations for Restoring the Functionality of Closed Drainage Systems]. St. Petersburg, AFI Publ., 69 p., EDN: RLTMGM. (In Russian).

2. Ostapchuk G.B., 2025. *Metodicheskie voprosy obnaruzheniya i kartirovaniya zakrytykh kollektorov osushitel'nykh meliorativnykh sistem sposobom georadarnoy s"yemki* [Methodological issues of detecting and mapping closed collectors of drainage and reclamation systems using ground penetrating radar surveying]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 15, no. 3, pp. 67-90, DOI: 10.31774/2712-9357-2025-15-3-67-90, EDN: JTQRZU. (In Russian).

3. Anzhenkov A.S., Pogodin N.N., Bolbyshko V.A., Levin G.Yu., Zakrzhevsky V.P., 2019. *Rekomendatsii po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu zakrytogo drenazha i oчитке водопропускных сооружений на открытой регулирующей сети с применением новых способов и технологий* [Recommendations for the Maintenance of Closed Drainage and Cleaning of Culverts in the Open Regulation Network using New Methods and Technologies]. National Academy of Sciences of Belarus, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture, Institute of Land Reclamation. Minsk, Institute of Land Reclamation, 66 p., EDN: YTEXPF. (In Russian).

4. Ostapchuk G.B., 2025. *Kartirovanie i tipizatsiya vymochek sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na osnove dannykh kosmicheskikh snimkov sverkhvysokogo prostranstvennogo razresheniya* [Mapping and typification of agricultural crop overwetting based on ultra-high spatial resolution satellite images]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 5, pp. 15-22, DOI: 10.26897/1997-6011-2025-5-15-22, EDN: GUOKIG. (In Russian).

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

6. Allred B.J., Daniels J.J., Fausey N.R., Chen C., Peters L., Youn H., 2005. Important considerations for locating buried agricultural drainage pipe using ground penetrating radar. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(1), pp. 71-87, DOI: 10.13031/2013.17915.

7. Becker A.M., Becker R.H., Doro K.O., 2021. 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*, vol. 41, no. 8, pp. 1-15, DOI: 10.1007/s13157-021-01495-6, EDN: IPAETJ.

8. Allred B., 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*, 15(3), pp. 119-134, DOI: 10.2113/JEEG15.3.119.

9. Koganti T., Ghane E., Martinez L.R., Iversen B.V., Allred B.J., 2021. Mapping of agricultural subsurface drainage systems using unmanned aerial vehicle imagery and ground penetrating radar. *Sensors* (Basel), Apr. 15, vol. 21, no. 8, 2800, DOI: 10.3390/s21082800, EDN: YUBSFG.

10. Kulizhnikov A.M., Eremin R.A., Pudova N.G., Zverev E.O., 2022. *Metodicheskie podkhody k obnaruzheniyu oslablennykh zon v dorozhnoy odezhde po dinamicheskim i kinematicheskim priznakam* [Methodological approaches to detection of weakened zones in the road surfaces by dynamic and kinematic features]. *Dorogi i mosty* [Roads and Bridges], no. 2(48), pp. 82-97, EDN: GJGXMO. (In Russian).

Информация об авторе

Г. Б. Остапчук – научный сотрудник, кандидат экономических наук, Агрофизический научно-исследовательский институт (195220, Санкт-Петербург, пр-т 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, ave. Grazhdanskiy, 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 28.05.2026; одобрена после рецензирования 25.09.2026; принята к публикации 30.09.2026.
The article was submitted 28.05.2026; approved after reviewing 25.09.2026; accepted for publication 30.09.2026.*