

МЕРЗЛОТНЫЕ И ГИБРИДНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ СООРУЖЕНИЙ СВЯТОЙ БОГОРОДИЧНОЙ КАНАВКИ

CRYOLOGICAL AND HYBRID GEOLOGICAL PROCESSES IN THE CLAY SOILS OF SVYATAYA BOGORODICHNAYA KANAVKA STRUCTURES

ЧЕРНЫШЕВ С.Н.

Профессор кафедры инженерной геологии и геоэкологии
Института гидротехнического и энергетического строительства (ИГЭС)
Московского государственного строительного
университета (МГСУ), д.г.-м.н.,
академик РАН, г. Москва,
9581148@list.ru

ТИМОФЕЕВ В.Ю.

Доцент кафедры инженерной геологии и геоэкологии
ИГЭС МГСУ, к.г.-м.н., г. Москва,
v-timofeev@list.ru

CHERNYSHEV S.N.

A professor of the engineering geology and geoecology department of the
Hydroengineering and Energy Construction Institute of Moscow State
University of Civil Engineering, doctor of science (Geology and
Mineralogy), academician of the Russian Academy of Natural Sciences,
Moscow, 9581148@list.ru

TIMOFEEV V.Y.

An associate professor of the engineering geology and geoecology
department of the Hydroengineering and Energy Construction Institute of
Moscow State University of Civil Engineering, candidate of science
(Geology and Mineralogy), Moscow, v-timofeev@list.ru

Ключевые слова:

Святая Богородичная канавка; Свято-Троицкий Серафимо-
Дивеевский монастырь; Нижегородская область; ров; вал;
откосы; сезонное промерзание грунтов; сезонное протаивание
грунтов; трещины; водопроницаемость; эрозия; суффозия;
оползни; осадка; гибридный геологический процесс.

Key words:

Svyataya Bogorodichnaya Kanavka; Svyato-Troitskiy Serafimo-
Diveevskiy Convent; Nyzhniy Novgorod Region; ditch; mound;
slopes; seasonal soil freezing; seasonal soil thawing; fissures;
water permeability; erosion; piping; landslides; subsidence; hybrid
geological process.

Аннотация

Ров и вал Святой Богородичной канавки вокруг части территории Свято-Троицкого Серафимо-Дивеевского монастыря на юге Нижегородской области были вручную воссозданы в 1997–2004 гг. по проекту Московского государственного строительного университета (МГСУ). В статье рассмотрены геологические процессы, протекающие в глинистых грунтах на рассматриваемом участке, по данным наблюдений авторов в течение последних 15 лет.

Введение

Промерзание и протаивание глинистых грунтов сопровождается пучением и другими процессами, имеющими большое значение для промышленного, гражданского, дорожного, гидротехнического, аэродромного и линейного строительства. В данной работе показано развитие этих процессов в оригинальных по конструкции земляных сооружениях Святой Богородичной канавки, сооруженной в 1977–2003 гг. на территории Свято-Троицкого Серафимо-Дивеевского монастыря в районном центре Дивеево на юге Нижегородской области.

Некоторые из описываемых в статье явлений сформированы одновременно двумя инженерно-геологическими процессами (ИГП), что дает право авторам писать о гибридных ИГП. Гибридным мы называем такой инженерно-геологический процесс, который несет в себе характерные черты двух ИГП (либо двух геологических процессов, если таковые протекают вне поля инженерной деятельности).

Цель статьи — познакомить специалистов со спецификой процессов в глинистых грунтах на экстремально крутых искусственных откосах, предназначенных для постоянной эксплуатации и эксплуатируемых уже 15 лет.

Abstract

The ditch and mound of the Svyataya Bogorodichnaya Kanavka around a part of the Svyato-Troitskiy Serafimo-Diveevskiy Convent in the south of the Nyzhniy Novgorod Region were manually reconstructed in 1997–2004 by the project of Moscow State University of Civil Engineering. The article considers the geological processes in the clay soils of this area using the authors' monitoring data for the last 15 years.



Рис. 1. Святая Богородичная канавка.
Общий вид ее начала

Характеристика сооружения

Святая Богородичная канавка первоначально была создана в 1829–1832 гг. по благословию преподобного Серафима Саровского. Изыскания и проектирование для ее воссоздания в 1997–2004 гг. (рис. 1) были проведены Московским государственным строительным университетом (МГСУ) [1, 3]. Канавка была построена как ограждение монастырской территории в форме земляного вала и рва. Если стены Соловецкого монастыря и Троице-Сергиевой лавры являлись мощными средневековыми оборонительными укреплениями и с успехом выдерживали осады интервентов, то земляные сооружения Дивеевского монастыря только имитируют древнейшие оборонительные сооружения славянских и угро-финских народов нашей родины (однако у них есть своя сакральная значимость [2, 4], которой в данной статье касаться не будем).

Рассматриваемое сооружение имеет протяженность 775 м и ограждает территорию площадью 4,4 га (три десятины). Это ров глубиной в среднем 2,13 м и вал над ним высотой также 2,13 м. Ров является бессточным. Откосы в глинистых грунтах высотой около 4,3 м по архитектурному замыслу покрыты травой, что исключает возможность использования многих принятых в строительстве мероприятий по закреплению такого рода склонов.

В советский период вал Святой Богородичной канавки был срыт, а ров засыпан. Точного плана этого сооружения не сохранилось. В 1997 г. руководство монастыря решило воссоздать канавку и обратилось за помощью в МГСУ. Авторами данной статьи были проведены изыскания, в составе которых был пройден 61 шурф. Большинство из них пересекло древнее засыпанное сооружение. Шурфы позволили определить положение оси и форму профиля первого рва. Он был выкопан в покровных суглинках, часто переходящих в глины (с числом пластичности $I_p = 13,4 \div 22,3$), подстилаемых толщей маловлажных кварцевых песков. На первой сотне метров первостроители (молодые насельники монастыря) пытались выполнить сооружение с заданным их наставником профилем — с глубиной и шириной рва по верху и высотой вала по три аршина (2,13 м). При этом создавались откосы в природных и насыпных глинистых грунтах высотой 4,3 м при горизонтальном проложении около 2,5 м. В нижней части поначалу создавали уклон 3:1. Позже, уступая природ-

ным обстоятельствам, перешли к уклону 2:1, но и это не спасло сооружение от разрушения геологическими процессами уже в ходе строительства. В шурфах, пройденных в процессе изысканий, было видно, что эти крутые незакрепленные откосы разрушались оползнями и эрозией. Преподобным Серафимом было разрешено в 2–3 раза уменьшить глубину рва и высоту вала. Откосы стали положе, объем работ уменьшился и был выполнен вручную за 3,5 года.

Современное руководство монастыря решило воссоздать сооружение в размерах, изначально заданных преподобным Серафимом Саровским. Требовалось создать откосы с уклоном 2:1 в бортах рва и 1:1 в насыпи. Расчеты показали, что такие откосы без крепления стоять не могут. Они были закреплены противэрозионными матами Enkamat® (полиамидной объемной сеткой «Энкамат») производства немецкой компании Colbond Geosynthetics GmbH, на которые была наложена сварная сетка из арматурных стержней, закрепленная стальными анкерами, забитыми в грунт на глубину 1 м. Все эти работы выполнялись вручную. По верху вала в соответствии с сакральной задачей сооружения была устроена дорожка, по которой теперь ежедневно летом и зимой проходит от 500 до 10 000 человек.

Процессы в глинистых грунтах земляного сооружения

Сезонное промерзание и протаивание грунтов вала и откосов рва захватывает грунты на разную глубину по поперечному профилю сооружения. При норме промерзания глинистых грунтов 150 см грунты вала промерзают глубже, поскольку он имеет выпуклую форму и отток тепла в нем идет по радиальной схеме. К тому же он менее защищен снежным покровом: дорожка очищается от снега, а на откосах вала снег плохо задерживается по причине их крутизны и открытости ветрам. В суровые зимы, когда много дней подряд температура удерживается ниже минус 30 °С и иногда даже опускается ниже 40 °С, вал промерзает насквозь.

В связи с этим в нем сформировались поперечные морозобойные трещины, не превышающие по ширине 2 мм. Они встречаются через каждые 40–50 м. Трещины фиксируются в покрытии пешеходной дорожки — они прямолинейно пересекают вал перпендикулярно его оси и разрывая брусчатку.

Морозобойные трещины свидетельствуют о малой влажности глинистых грунтов вала в целом, вследствие чего грунты при замерзании не расширяются, а сокращаются в объеме. Следует отметить, что эти трещины не влияют на устойчивость откосов, поскольку перпендикулярны направлению их простираения.

Откосы рва промерзают меньше, т.к. в середине зимы он бывает на 75% заполнен снегом. Но зато они позже протаивают, если снег сохраняется в слабо прогреваемой выемке рва. Снег в ней оседает, подтаивая снизу. В мягкие зимы грунты на дне не промерзают, т.к. находятся на глубине более 2 м от поверхности земли и прикрыты более чем метровым слоем снега. Вал высотой около 2 м также защищает выемку рва от промерзания. Поскольку дно имеет положительную температуру, над ним внутри снежного покрова образуется

арка, или труба, по которой талые воды постоянно стекают к дренажным колодцам. Колодцы, имея глубину 3–6 м, не замерзают. Над их крышками в снежном покрове всегда образуются ямы, т.к. снег над колодцами тает в течение всей зимы.

О наличии теплого полого пространства в снежном покрове над дном рва свидетельствует следующее наблюдение. В начале февраля 2011 г. можно было видеть отверстия на поверхности снежного покрова, окаймленные кристаллами инея и мелкими сосульками, свидетельствующими о подъеме теплого и влажного воздуха со дна рва. Это явление можно назвать «эффектом берлоги», поскольку образование инея происходит и при дыхании зверя. Названная особенность температурного режима дна рва может быть использована, например, для выращивания теплолюбивых многолетников типа винограда, который на зиму можно укладывать в ров. Там ни корни, ни ветви лозы не пострадают от морозов, притом что средняя температура января в Дивееве составляет примерно минус 12 °С, а известный минимум достигал минус 43 °С.

Верхняя часть откосов рва существенно промерзает, поскольку снег с нее сваливается вниз. Промерзанию бровки внутреннего борта рва способствует также угловая форма поверхности, благодаря которой создается не плоский, а радиальный отток тепла из грунта (как и в случае вала). Промерзание грунтов становится причиной их пучения на внешнем борте рва.

Пучение на крутых откосах рва связано с промерзанием замоченного с осени глинистого грунта. Вода в грунт поступает преимущественно с внешнего контура сооружения. Особенностью Святой Богородичной канавки является то, что промерзание развивается не в вертикальном, как обычно, а в горизонтальном направлении. Пучение вызывает сужение рва и выражается в деформациях горизонтальных речных распоров, установленных поперек него, которые изгибаются и ломаются, свидетельствуя о сближении бортов на 3–5 см за сезон (рис. 2). Наиболее сильно пучение проявилось сразу после создания земляного сооружения — зимой 2003/04 г. Оно было отмечено на отдельных участках. В 2005 и 2006 гг. пучение проявлялось в меньшей степени и было заметно на тех же участках.

После протаивания не происходило гравитационного уплотнения распученных грунтов. Суммарная деформация пучения в отдельных местах рва к 2008 г. достигала 10 см, а в одном месте даже 15 см. В последующие годы замененные распоры уже не деформировались.

Вследствие пучения глины и суглинки были существенно разуплотнены до глубины 30–40 см от поверхности откоса. В этой зоне они превратились в пыль с текстурой типа извести-пушонки. Отобрать монолит такого грунта для определения его плотности невозможно, т.к. он рассыпается, а при отборе стаканом уплотняется. Зона разуплотнения имеется в сложенных утрамбованными глинистыми грунтами откосах как рва, так и вала.

Разрыхленная пучением зона рыхлых и сухих пылевато-глинистых грунтов мощностью около 0,4 м, подобно снежному покрову, служит естественным теплоизоляционным слоем, а также демпфирует расширение нижележащих грунтов, если они все же расши-



Рис. 2. Изломы распоров при пучении бортов рва

ряются при промерзании. Поэтому наращивание мощности зоны разуплотнения идет во времени с затухающей скоростью.

Если при реконструкции откосов рыхлые грунты будут уплотнены или заменены на уплотненный чернозем, то пучение может возобновиться. В качестве мер по его предотвращению можно предложить осушение откосов и замену рыхлых грунтов на искусственный пористый и плодородный материал, который взял бы на себя теплоизоляционные функции, обеспечивая одновременно устойчивость откосов и питание растительного покрова.

Разуплотнение в результате пучения создает значительную водопроницаемость грунтов. Покровные суглинки и глины макропористы. Макропоры, вероятно, расширяются при замерзании в них воды. В грунтах природного сложения в зоне промерзания повсеместно имеется также частая сеть тонких ортогональных трещин, разбивающих грунт на отдельные почти кубической формы с длиной ребра порядка 1 см. Летом, когда грунт имеет полутвердую и твердую консистенцию, в отвалах шурфов он выглядит как дресва. Он распадается на отдельные. По притоку верховодки к одному из шурфов авторы определили коэффициент фильтрации покровных отложений — он составил порядка 0,5 м/сут. Сходное значение этого коэффициента было получено и обратным расчетом по фильтрационным потерям через ложе пруда, находящегося рядом с рассматриваемым сооружением.

Хорошую водопроницаемость глинистых отложений подтверждает следующий факт. В 2002 и 2003 гг., когда дно рва не имело покрытия и не было обеспечено каким-либо водоотведением, после двух экстремальных летних ливней во рву скапливалась вода, стоявшая



Рис. 3. Проскальзывание грунта под арморешеткой фиксируется по прижатой траве

над дном слоем до 0,5 м. Через сутки вода исчезала, профильтровавшись сквозь глинистое дно.

На не закрепленных травой участках откосов рва и вала под сеткой «Энкамат» развивается эрозия грунта. Выносятся разуплотненные пучением грунты, в откосе образуются пустоты типа нор глубиной до нескольких десятков сантиметров — преимущественно до 20–30 см. Это не ложбины стока, а изометричные в плане углубления в поверхности откоса. Диаметр таких ямок также примерно равен 20–30 см. Плотность их расположения на откосах составляет от 0,1 до 4,0 штук на 1 м². В рассматриваемых грунтовых условиях сетка «Энкамат» может успешно сопротивляться эрозии только в сочетании с дерниной или георешеткой. При проектировании ставка была сделана на дернину газона. Однако газон повсеместно создать не удалось из-за резких различий в инсоляции между различными участками сооружения и агротехнических ошибок. Судя по форме пустот, их можно отнести не к эрозионным, а к суффозионным. Здесь мы имеем дело с гибридным геологическим процессом — сочетанием эрозии с суффозией, когда идет вынос грунта из массива и смыв его вниз по откосу.

Оползни постоянно угрожают крутым откосам земляных сооружений Святой Богородичной канавки, выполненным в суглинках и глинах покровного и техногенного происхождения. Они беспокоили сестер Мельничной обители еще при жизни преподобного Серафима. Авторы наблюдали следы древних оползней в шурфах при проведении изысканий.

Сестры монастыря, выполнявшие работы по воссозданию сооружения, поначалу также не имели опыта и недооценили необходимость точно следовать рекомендациям МГСУ. В начале работ, в октябре 1998 г., когда в течение нескольких часов выпал и растаял слой снега толщиной около 10 см, возник значительный оползень откоса рва и вала. Вода из мокрого снега целиком перешла в вал — в недоуплотненный грунт, ошибочно положенный с наклоном слоев насыпи в сторону рва. Протяженность оползня вдоль рва составила 50 м, а ширина оползшего блока — 2 м. Оползень захватил искусственные откосы почти на всю высоту, равную 4,3 м. В дальнейшем были приняты меры — и оползание внутреннего борта рва, нагруженного грунтами вала, уже не происходило. Строители стали укладывать слои

вала горизонтально и хорошо их трамбовать. Вал шириной около 6 м защитил подстилающие его глинистые насыпные и покровные грунты от замачивания атмосферными осадками. Снизу замачивание невозможно, т.к. глинистые грунты подстилаются песками с влажностью порядка 3–5%. Поэтому в следующие после 1998 г. 13 лет оползни с вала в сторону рва не сходили.

Позже оползневым деформациям стал подвергаться внешний откос канавки. В начале июня 2003 г. ополз внешний борт рва у перекрестка Школьной и Первомайской улиц. Образовался оползневый уступ высотой и шириной примерно по 0,4 м и протяженностью вдоль рва около 10 м. Оползень захватил борт рва почти на всю глубину. Его масса около 12 т не обрушилась в ров, но зависла на «Энкамате». При ремонтных работах все тело оползня было удалено. Грунт был уложен обратно с армированием его сетками, прикрепленными с помощью стальных анкеров к массиву грунта за поверхностью смещения. В последующие 7 лет признаков подвижек на отремонтированном участке не было. Однако на соседних участках наблюдались явления подготовки к оползням: параллельно бровке рва на расстоянии 0,5 м от нее в глинистом грунте возникали оползневые трещины отрыва шириной 2–3 мм. Путем кольматации трещин и укрепления рва распорами развитие оползневого процесса было остановлено.

В 2010 г. у того же перекрестка обнаружился наклон внешней металлической ограды в сторону рва, что свидетельствует о пластическом течении глинистого грунта от Первомайской улицы к выемке. Столбы ограды наклонены в сторону рва с отклонением от вертикали до 10°. Расстояние от дороги до борта выемки составляет 1,4 м. Столбы ограды здесь заложены в скважины глубиной 2,5 м при глубине рва 2,13 м. На участке около монастырской гостиницы «Умиление» оползень начал движение 6 августа 2009 г. и был остановлен своевременной установкой распоров. Оползневые трещины отсекли тело оползня на протяжении 20 м вдоль рва. Трещины прошли по глинистому грунту на расстоянии 0,30–0,45 м от бровки откоса. Отсеченная ими полоса опустилась на 0,2 м. Арморешетка не сместилась, сетка «Энкамат» не была разорвана (рис. 3). При этом грунт проскальзывал под арматурой решетки вниз. В нижней части откоса произошел едва заметный выгиб решетки внутрь рва. Объем выпуклости откоса далеко не соответствует объему пустоты над оползневым уступом. Поэтому механизм деформации необходимо квалифицировать не только как развитие оползня, но и как просадку при увлажнении (замачивании осадками) грунта, разрыхленного пучением.

В стене одноэтажной кирпичной гостиницы, прилегающей к оползневому участку, образовались трещины с суммарным раскрытием 2 мм, не нарушившие эксплуатационную пригодность здания. Его ленточный фундамент из фундаментных блоков отстоит от бровки рва на 1,4–3,0 м. Трещины в стенах над оконными проемами отстоят от рва на 5–6 м. Заглубление фундамента меньше глубины рва. Деформации здания свидетельствуют о наличии горизонтальной составляющей подвижки, т.е. оползневой составляющей, а не только просадочной. Здесь во второй раз можно выделить гибридный геологический процесс. Причина возникшей просадочно-оползневой деформации заключается в за-

мачивании грунтов борта канавки ливневыми водами с крыши гостиницы, которые не отводились, а застаивались в виде луж под водосточными трубами на расстоянии 1,5–3,0 м от рва. Пластическое течение глинистых грунтов, из которых состоят откосы рва и вала, отмечается по деформациям сооружений. Следствием пластического течения без разрыва сплошности грунта явились трещины в здании гостиницы «Умиление». После закрепления рва распорами, достаточно многочисленными для удержания откоса, пластическая горизонтальная деформация основания здания затухла.

В 2010 г. на участке вдоль Первомайской улицы у ее пересечения со Школьной улицей обнаружился наклон металлической ограды монастыря в сторону Святой Богородичной канавки, что свидетельствует о пластическом течении глинистого грунта от Первомайской улицы ко рву. Столбы ограды наклонены в сторону рва с отклонением от вертикали до 10° . Расстояние от проезжей части до борта рва здесь минимально и составляет 1,4 м. Столбы ограды заложены в скважины глубиной 2,5 м при глубине рва 2,13 м. На остальной части ограды ее столбы заложены на глубину 0,5 м. Причиной пластического течения здесь является замачивание глинистых грунтов из кюветов дороги, которые имеют недостаточный уклон. Медленное равномерное горизонтальное движение насыпных грунтов без разрывов сплошности привело за 8 лет к перемещению поверхности земли у перекрестка на несколько сантиметров. Ширина рва в этом месте сократилась на 6 см.

Геодезическими методами были зафиксированы осадка и усадка вала от прогрева экстремально жарким летом 2010 г., имевшие неравномерный характер и достигавшие нескольких десятков сантиметров. Усадка, сопряженная с осадкой, также представляет собой гибридный геологический процесс. (Кстати, эти процессы обычно сопрягаются в основаниях зданий на глинистых грунтах при наличии значительного теплопотока от здания в сторону основания.) На поверхности дорожки, идущей по валу, вследствие осадочного уплотнения грунтов заметны продольные и поперечные волны с амплитудой до 5 см и длиной волны порядка 1–2 м. Отмечаются значительные понижения той стороны дорожки, которая базируется на более «молодых» насыпях 2003 и 2004 гг. (а не 1997–2002 гг.), когда вал был уширен, а его откосы сделаны более пологими — до уклона 1:1.

По всему валу также наблюдается опускание покрытия вдоль обеих сторон брусчатой дорожки, вызванное пластическим течением глинистых грунтов, замачиваемых с поверхности откоса (рис. 4). Со стороны, расположенной над высоким откосом, опускание покрытия более заметно и составляет 2–5 см относительно середины дорожки (нормальная высота этого откоса сейчас равна 4,26 м, высота откоса с противоположной стороны дорожки составляет от 1,0 до 2,5 м). Ремонт покрытия пешеходной дорожки, уложенного в июле 2003 г., ни разу не производился. Отмеченные деформации накоплены за весь период его эксплуатации.

На первом участке, где вал был сформирован в 1997–1998 гг., вдоль ограды со стороны высокого откоса идет ложбина, глубина которой в августе 2009 г. местами достигала 3,5 см, а в мае 2011 г. — 3,7 см (разница — в пределах точности измерений). Вдоль другой



Рис. 4. Деформация дорожки вследствие пластического течения грунта. Ее первоначально плоская поверхность «ушла» от плоскости, обозначенной нижней поверхностью деревянной рейки

стороны ограды во многих местах также прослеживается ложбина, но она прерывистая и значительно меньшей глубины. Наличие этих ложбин и их разная величина также интерпретируются как следствие пластического течения глинистого грунта вдоль откосов вала.

При относительной стабильности грунта в ядре вала грунты в откосах имеют максимальный гидравлический уклон потока. Здесь в силу увлажнения при выпадении осадков и поливе газонов грунты более пластичны, чем в ядре. Отсюда и возникают неравномерные пластические деформации дорожки со скоростью 0,1–0,7 см/год. Деформации искажают ее вид и препятствуют стоку дождевых вод в водоотводящие лотки, проложенные вдоль наружной стороны дорожки, и активизируют рассматриваемый процесс.

Заключение

Описанные процессы горизонтального пучения на крутых (с уклоном 2:1) откосах с образованием «глины-пушонки» и последующими просадочно-оползневыми и эрозивно-суффозионными деформациями ранее, видимо, в инженерно-геологической литературе не отмечались. Однако современные геосинтетические материалы позволяют создавать такие откосы. Опыт авторов показал, что такие откосы при анкерном креплении могут безаварийно служить более 10 лет. Хотелось бы надеяться, что этот опыт будет полезен для специалистов и научная инженерно-геологическая общественность примет предложение рассматривать некоторые геологические и инженерно-геологические процессы как гибридные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев С.Н. Инженерно-геологические условия, фундаменты и грунтовые сооружения Свято-Троицкого Серафимо-Дивеевского женского монастыря // Вестник МГСУ. 2009. № 1. С. 77–85.
2. Чернышев С.Н. Святая Богородичная канавка: история и воссоздание // Мир Божий. 2008. № 13. С. 108–113.
3. Чернышев С.Н., Щербина Е.В. Святая Богородичная канавка: природные условия и технические решения по воссозданию // Труды 2-го Международного научно-практического симпозиума «Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси». Сергиев Посад: Изд-во Московской Патриархии, 2005. С. 247–253.
4. Чичагов С. Летопись Серафимо-Дивеевского монастыря. С.-Петербург, 1903. 851 с.