

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕОРИИ СИСТЕМНО-СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Д. И. Кацко, аспирант*

*А. И. Кацко, аспирант*

*Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,  
г. Краснодар, Россия*

### Аннотация

Современное состояние системной инженерии в мелиоративной науке характеризуется интенсивным развитием, генерацией и внедрением новых идей, опирающихся на системную идеологию. В Российской Федерации получил развитие не только системный анализ, но и системный синтез. Для создания принципиально новых систем, обладающих априорно заданными свойствами, Ю. И. Лыпарём была разработана теория системно-структурного проектирования (ТССП). Охрана территорий от оползневой опасности предполагает внедрение комплекса мелиоративных мероприятий. К одному из таких мероприятий относится создание удерживающих противооползневых сооружений. В настоящей статье предлагается рассмотреть ТССП на примере противооползневых сооружений, хотя сфера ее использования применима для различных видов мелиораций.

**Ключевые слова:** *системный подход, системный синтез, мелиоративная система, оползень, риск, инженерная защита территорий, природно-технический комплекс.*

### Abstract

*D. I. Katsko, A. I. Katsko*

### USING ELEMENTS OF THE THEORY OF SYSTEM-STRUCTURAL SYNTHESIS IN THE DESIGN OF ANTI-LANDSLIDE INSTALLATIONS

The current state of systems engineering in reclamation science is characterized by intensive development, generation and implementation of new ideas based on the system ideology. Not only system analysis, but also system synthesis has been developed in Russian Federation. Yu. I. Lypar developed the theory of system-structural design (TSD) based on the creation of fundamentally new systems with a priori given properties. Protection of territories from landslide danger involves the introduction of a complex of land reclamation measures. One of these measures includes the creation of holding anti-landslide structures. This article suggests a review of the SSP using the example of anti-landslide structures, although it is obvious that its scope is applicable to various types of land reclamation.

**Keywords:** *system approach, system synthesis, land reclamation system, landslide, risk, engineering protection of territories, natural and technical complex.*

### Введение

Оползневые процессы – это опасные природные явления, когда в результате действия поверхностных и грунтовых вод, техногенных факторов и т. д. грунтовые массы отрываются от склона.

Вдоль Черноморского побережья Краснодарского края оползневая пораженность колеблется от 10 до 70 % и достигает 80 % в пределах Большого Сочи. Борьба с оползнями проводится с использованием таких мероприятий, как лесомелиоративные (высадка защитных полос древесно-кустарниковых насаждений), запрет вырубki растительности на склонах и др. Часто применяется инженерная защита от оползней в виде: а) террасирования

(то есть уположения склона с серией ступенчатых площадок), которое способствует снижению скорости воды и уменьшает эрозию; б) устройства контрбанкета у подножия склона для его стабилизации; в) устройства открытых водостоков и противофильтрационных покрытий; г) дренирования подземных вод, д) противооползневых сооружений, которые наиболее результативны в механическом удержании оползневых масс.

Для наиболее эффективной работы противооползневого сооружения важно подобрать его оптимальное расположение. По отношению к защищаемому объекту сооружения подразделяются на верховые и низовые. При

расчетах противооползневого сооружения также подбирается определенное количество рядов свай, анкером, их шаг, длина и диаметр. В процессе проектирования при таких факторах, как угол склона, тип почвы, наличие грунтовых вод, климатические условия и т. д., оптимально сочетают конструкции, дренажные системы, земляные работы и др., чтобы выполнялись условия минимальных затрат, обеспечивались техническая и технологиче-

**Материалы и методы исследований**

При проектировании противооползневого сооружения необходимо учитывать следующие факторы: его тип, способ устройства, габариты, глубину заложения, основные геометрические параметры, тип конструкций крепления, материалы для изготовления, способ защиты от подземных вод, несущую способность основания, внутренние усилия и напряжения в сооружении, монтажные элементы, порядок производства работ, мероприятия для снижения влияния строительства на окружающую среду, мероприятия для минимизации влияния на гидрогеологические условия, назначение необходимых испытаний, мероприятия по контролю качества, мероприятия по мониторингу [2].

Тип противооползневого сооружения следует выбирать, учитывая проектируемый перепад высот и характер рельефа, планируемый срок эксплуатации, инженерно-геологические условия, наличия подземных вод, стесненности строительной площадки и наличия окружающей застройки.

Для выполнения перечисленных выше (и других) требований к проектируемому сооружению важно соблюсти подход к их выпол-

ская возможности строителей, доступность материалов, работа в пределах кадастровых границ, минимальное нанесение экологического вреда и т. д.

В основу формирования (синтеза) мелиоративных систем в сельском хозяйстве предлагается положить теорию системно-структурного проектирования (далее – ТССП) сложных систем Ю. И. Лыпаря [1].

нению в непротиворечивой и согласованной последовательности.

С точки зрения современной системной инженерии [1–5] для развития теории синтеза противооползневых сооружений [6–11] необходим развитый категориальный аппарат и введение общих требований, отражающих функциональный, структурный, технологический и конструкторский аспекты (табл. 1).

С точки зрения наблюдателей  $N$  – заказчиков, наблюдателей, строителей, конструируемый объект можно представить в виде компонент, обеспечивающих его системные свойства в соответствии с целями  $Z$ :

$$S \stackrel{\text{def}}{<} Z, S, T, \Phi, C, N >. \quad (1)$$

Традиционно теория принятия решений для получения эффективного решения (достижения цели при наименьших затратах) требует формализации шагов лица, принимающего решения. На первом этапе формулируется цель (создание сооружения для противооползневой защиты), далее – технологические, экономические и другие требования (далее – ТЭТ).

В табл. 2 показаны страты (аспекты) ТЭТ.

Таблица 1. Аспекты создаваемого объекта (системы)

Аспекты	Содержание аспекта
Структурный, $S$	Внутрисистемные связи, обеспечивающие системные свойства (эмерджентность, целостность)
Технологический, $T$	Материалы, методы, процессы
Функциональный, $\Phi$	Требования к создаваемой системе
Конструкторский, $C$	Геометрия нового объекта

Таблица 2. Этапы процесса формирования объекта

Этап	Содержание этапа
Формализация ТЭТ	Перевод ТЭТ на формализованный язык (вербальный, знаковый, объектный)
Принципы построения	Допустимые логические конструкции (изучение взаимодействия противоположного сооружения с окружающей средой (почвами, водой и т.д.)
Аппроксимация	Модельное представление противоположного сооружения; детерминированная и вероятностная оценка устойчивости; документация проекта
Способы построения	Выбор оптимальных материалов и технологий устройства противоположных сооружений для решения задачи с минимальными затратами
Структуры	Монолитные конструкции, сборные элементы, габионы, анкерные сваи, шпунты, буронабивные сваи, реализующие способы построения и позволяющие на инструментальном уровне построить модель, полученную на этапе аппроксимации
Параметры	Параметры модели этапа аппроксимации
Допуски	Допустимые отклонения при которых задача удержания оползня имеет решение

Выполнение противоположным сооружением поставленной цели – удержание оползневого тела – обеспечивается внутренними компонентами или требованиями, которые, согласно теории системно-структурного проектирования Ю. И. Лыпаря, разделяют на четыре аспекта (страты) процесса синтеза: тех-

нологический, функциональный, структурный и конструкторский (рис. 1).

На каждом этапе аспекта осуществляется отсеечение решений, не удовлетворяющих заданным требованиям. Оставшиеся эквивалентные решения позволяют осуществить выбор эффективного, наименее затратного решения.

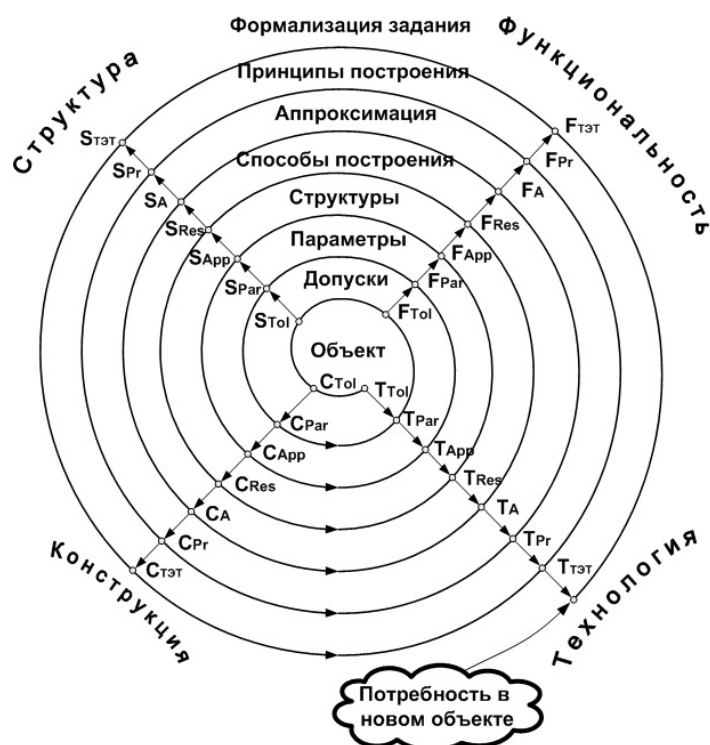


Рис. 1. Спиралевидная модель процесса проектирования [1]

**Результаты исследования и их обсуждение**

Рассмотрим более подробно аспекты ТССП применительно к задаче системного синтеза сооружений инженерной защиты территорий от оползней [12–15].

**1. Структурный (S).**

$$S = \{STR_{пр}, STR_{орг}, \dots\}.$$

Согласно [2], противооползневые сооружения подразделяются на следующие:

а) по расположению сооружений на склоне относительно объекта защиты (рис. 2):

- 1) верховое сооружение (расположенное сверху от объекта);
- 2) низовое (расположенное снизу от объекта);

б) по мощности удерживаемого оползневой массива (рис. 3):

- 1) сооружения, удерживающие всю оползневую толщу;

2) удерживающие нижнюю часть оползневой толщи, создавая стесненные условия, где оползневый грунт «переползает» сооружение;

в) сооружения по длине фронта удержания:

- 1) перекрывающие весь оползневый участок;
- 2) локальные сооружения;

г) сооружения по выполняемой задаче инженерной защиты (рис. 4):

- 1) непосредственное удержание оползневой массы;
- 2) создание стесненных условий, препятствующих смещению оползневых масс;
- 3) защита отдельного объекта, где оползневой массив его обтекает;
- д) по количеству рядов, удерживающих оползневый склон:
  - одноярусные;
  - многоярусные (два и более ярусов).

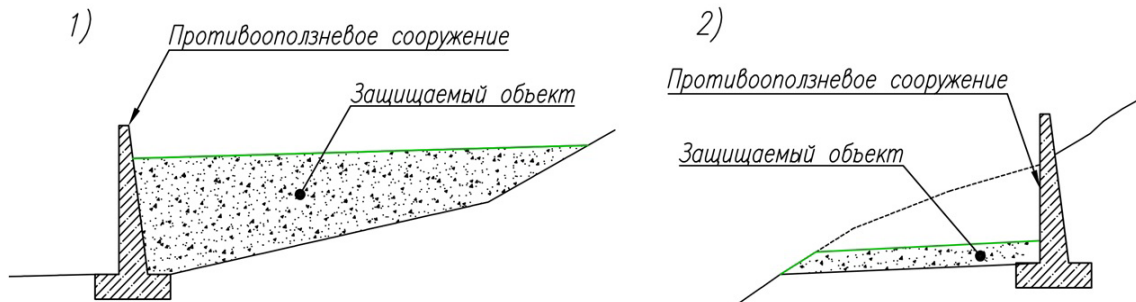


Рис. 2. Верховое и низовое противооползневые сооружения

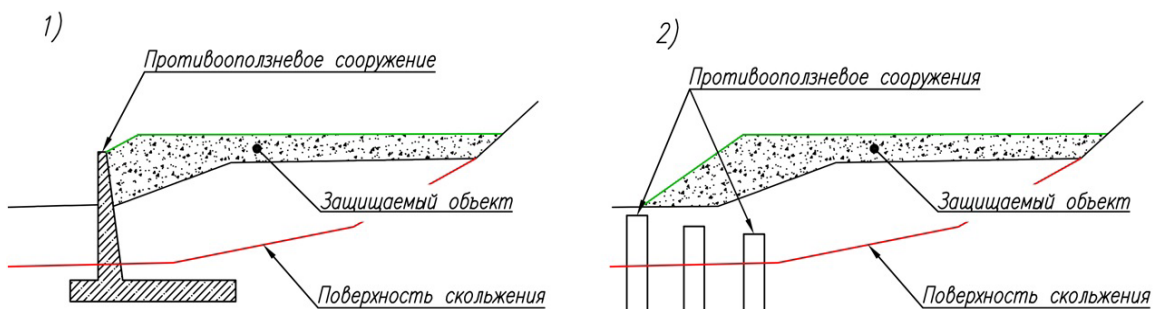


Рис. 3. Противооползневые сооружения, удерживающие всю оползневую толщу и ее часть



Рис. 4. Противооползневые сооружения, удерживающие весь оползневой массив, создающие стесненные условия, защищающие отдельный объект



## 2. Технологический (Т).

$$T = \{meth, resources, alg, \dots\}.$$

Применение различных видов технологий обуславливается строительной техникой, которая используется при устройстве противооползневых сооружений. Для их возведения необходимо устройство ровной строительной площадки, которая перед началом работ тщательно планируется и усиливается подготовкой в виде щебня или монолитной плиты для обеспечения надежного основания по всей площади.

Для срезки земли и возведения насыпи необходимо использовать автосамосвал и экскаватор. Для монолитных конструкций нужен автобетоносмеситель, для сборных конструкций – автокран; для устройства анкерных свай – соответствующие многофункциональные буровые установки, где долбление (размельчение) ведется периодическими ударами бурового долота по забою скважины. Для буронабивных свай осуществляется вращательное бурение с обсадной трубой или без нее. В зависимости от грунтов, по сложности разработки и размеров свай, подбирается буровая установка с соответствующей мощностью. Для установки шпунта используют, как правило, вибропогружатель.

Важно учитывать вес строительной техники и ее габариты, так как, как правило, работы на склоне происходят в стесненных условиях.

## 3. Функциональный (Ф).

$$\Phi = \{ \varphi_{вх}, \varphi_{in} \}.$$

В общем случае при разработке противооползневых мероприятий решаются следующие задачи [14]:

- регулирование поверхностного стока;
- регулирование подземного стока;
- устранение причин, вызывающих оползневые процессы;
- стабилизация рассматриваемого объекта (обеспечение местной и общей устойчивости);
- ликвидация последствий воздействия оползневых процессов.

Основная функция противооползневых сооружений – препятствовать механическому сдвигу оползневой массы.

Данные сооружения подразделяются [15]: на удерживающие, то есть препятствующие или создающие стесненные условия для смещений оползневого грунта;

защитные, отклоняющие перемещение оползневого грунта от объекта защиты, создавая условия обтекания грунта.

Противооползневые сооружения рассчитываются на восприятие следующих нагрузок:

- собственный вес сооружения;
- вес обратной засыпки;
- вес других сооружений, находящихся в зоне влияния на противооползневое сооружение;
- давление грунта и напряжения в основании;
- давление подземных вод при установившемся режиме;
- вес стационарного оборудования и складированных материалов;
- давление подземных вод при избыточном поровом давлении;
- динамическая нагрузка от транспорта и оборудования;
- деформации основания, вызванные экскавацией грунта или ухудшением свойств грунта;
- сейсмические воздействия;
- воздействия, обусловленные деформациями основания и сопровождающиеся коренным изменением структуры грунта (например, при просадках и набухании грунтов).

## Конструкторский (С).

Противооползневые сооружения можно разделить по характеру взаимодействия с грунтом: на массивные (гравитационные), угольковые (с грунтовым противовесом) и гибкие (консольные) [15].

*Массивные (гравитационные) противооползневые сооружения* (рис. 5). В конструктивном аспекте они удерживают грунт за счет собственного веса, сопротивляясь сдвигу и опрокидыванию.

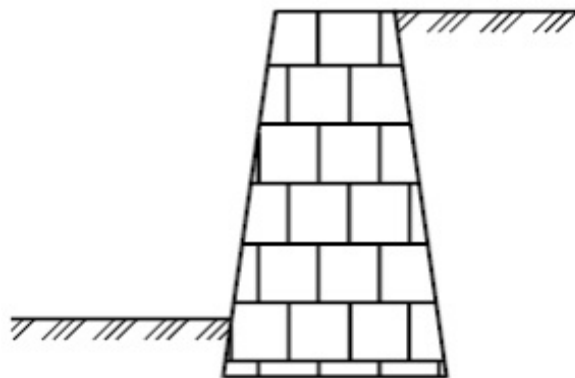


Рис. 5. Гравитационное противооползневое сооружение

Технологически гравитационные сооружения устраиваются на поверхности земли или в предварительно разработанных траншеях. Массивные противооползневые стены выполняются с подрезкой склона или насыпью, что требует оценки земляных работ; они изготавливаются из железобетона, бутобетона, бутового камня в ГСИ, бетона, каменной кладки и т. д.

*Угловые (с грунтовым противовесом) противооползневые сооружения* (рис. 6). Конструктивно они удерживают грунт за счет дополнительного пригруза, сопротивляются сдвигу и опрокидыванию.

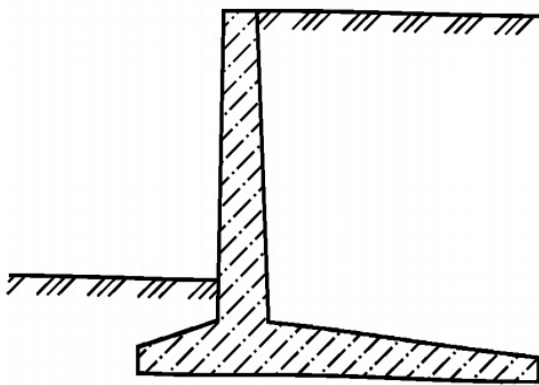


Рис. 6. Угловое противооползневое сооружение

Технологически они устраиваются на поверхности земли, в широких траншеях; изготавливаются из железобетона или других материалов. Как и в случае гравитационных стен, это сопровождается большими объемами земляных работ.

Функционально массивные и угловые противооползневые сооружения применяют преимущественно при строительстве линейных объектов, а также при благоустройстве склонов и откосов.

*Гибкие (консольные) противооползневые сооружения* (рис. 7) – такие сооружения, которые можно разделить по способу устройства на шпунт, сооружение из буровых свай, сооружение из грунтоцементных элементов (микросвай). Конструктивно они удерживают грунт, сопротивляясь сдвигу и опрокидыванию за счет заделки в скальный грунт. Глубина заделки гибких противооползневых стен ниже отметки экскавации или планировки и определяется из условия невозможности разрушения основания.

Технологически их устраивают в предварительно разработанных (лидерных) скважинах, в узких траншеях или без предварительной разработки грунта (например, вдавливанием; выполняются из железобетона или металла, как правило, круглого сечения (рис. 8).

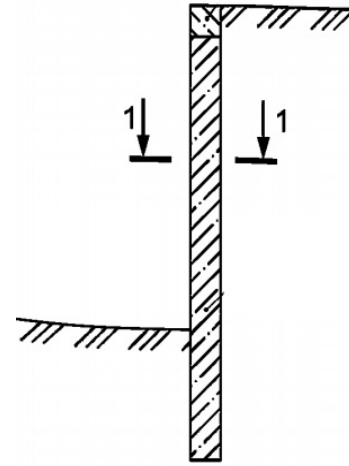


Рис. 7. Консольное противооползневое сооружение



Рис. 8. Сечение 1–1 (плановое положение)

Функционально шпунт используется в качестве временного сооружения, чтобы создать глубокую выемку грунта и избежать его осыпания.

Технологически сооружения устраиваются с помощью вибропогружателя.

Функционально сооружения из буровых свай являются наиболее распространенным, проверенным и эффективным решением в условиях борьбы с активным оползнем. Они предпочтительны в силу того, что у них большая глубина заложения с заделкой в несдвигаемые породы, что позволяет удерживать оползень большой мощностью; также нет необходимости подрезать склон при устройстве, то есть не требуется глубоких котлованов, подрезок, дополнительного оборудования, вспомогательных сооружений.

Технологически сооружения из буровых свай устраиваются в грунте путем установки в предварительно разработанных скважинах арматурного каркаса или металлических труб и заполнения бетонной смесью.

Функционально сооружения из грунтоцементных элементов (микросвай) могут при-

меняться для усиления существующих конструкций инженерной защиты или в качестве самостоятельных защитных и удерживающих сооружений.

Конструктивно они отличаются малым диаметром свай (до 350 мм) и более частым расположением.

Технологически, благодаря компактности конструкций и оборудования, их рекомендуется использовать при производстве работ в труднодоступных, стесненных условиях.

Таким образом, проектирование ведется параллельно по всем четырем аспектам с учетом ТЭТ:

1) *в технологическом аспекте* рассматривается возможность устройства оптимальной конструкции противооползневого сооружения в условиях ограничений: экономических, возможностей строителей, природных условий, доступности материалов;

2) *в функциональном аспекте* проектирования оценивается, на сколько противооползневое сооружение удовлетворяет задаче удержания оползневых масс;

### Заключение

Теория системно-структурного проектирования (синтеза) содержательно дополняет традиционный системный анализ существующих систем в мелиорации и других сферах инженерии.

Использование ТССП в области синтеза простых и сложных мелиоративных систем позволяет перейти к алгоритмическому подходу, существенно упрощающему процесс проекти-

3) *в структурном аспекте* представляются возможные решения, которые желательно описать формально (для сравнения). Так, для оценки устойчивости склона с разными вариантами противооползневых сооружений основным показателем для сравнения является коэффициент устойчивости. Учет местных условий и формы нарушения устойчивости играет определяющую роль в эффективности проектирования противооползневых мероприятий. Безусловно, весьма полезен опыт специалистов при рассмотрении различных вариантов инженерной защиты;

4) *в конструкторском аспекте*, в соответствии со структурным аспектом, анализируются требования, подбираются соответствующий тип конструкции противооползневого сооружения и его параметры (глубина заложения, шаг и диаметр свай, с грунтовыми анкерами или без них и т. д.).

Таким образом, о характеристиках и особенностях сооружения противооползневой защиты (системы) становится известно еще до того, как появится схема самой системы (объекта).

роования новых противооползневых сооружений.

Процесс проектирования удерживающих противооползневых сооружений можно представить в виде спиралевидной модели по четырем аспектам: технологическому, функциональному, структурному, конструкторскому, однако общая идеология применима и к другим видам мелиорации

### Библиографический список

1. Лыпарь, Ю. И. Системно-структурный синтез / Ю. И. Лыпарь // Системный анализ и принятие решений : словарь-справочник ; под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. – Москва : Высшая школа, 2004. – С. 427–439.
2. Методические рекомендации по расчету и проектированию свайных противооползневых сооружений инженерной защиты автомобильных дорог : ОДМ 218.2.050-2015. – Введ. 17.08.2015. – Москва : Росавтодор, 2017. – 83 с. – («НТЦ ГеоПроект»).
3. Семечкин, А. Е. Системный анализ и системотехника / А. Е. Семечкин. – Москва : SvS-Аргус, 2005. – 536 с.
4. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков, У. Н. Свит, С. Дж. Сеймур, С. М. Бимер // пер. с англ. ; под ред. В. К. Батоврина. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 624 с.
5. Халл, Э. Инженерия требований / Э. Халл // пер. с англ. А. Снастина ; под ред. В. К. Батоврина. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 218 с.

6. Методы системного анализа в мелиорации и водном хозяйстве / Б. Г. Штепа [и др.] ; под ред. Б. Г. Штепы. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1983. – 261 с.
7. Костяков, А. Н. Основы мелиораций / А. Н. Костяков. – Изд. 6-е. – Москва : Сельхозгиз, 1960. – 662 с.
8. Голованов, А. И. Становление и развитие теории природообустройства / А. И. Голованов // Мелиорация и вод. хоз-во. – 2010. – № 5. – С. 18–22.
9. Голованов, А. И. Методология мелиорации / А. И. Голованов // Природообустройство. – 2009. – № 4. – С. 5–16.
10. Ивонин, В. М. Мелиоративные системы: основы общей теории / В. М. Ивонин // Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 119–140.
11. Гребнев, Ю. С. Инженерная защита от опасных геологических процессов : руководство по расчету и проектированию противооползневых мероприятий / Ю. С. Гребнев. – Москва : ГЕОС, 2008. – 274 с.
12. Маций, С. И. Инженерная защита объектов от склоновых процессов : учебник / С. И. Маций, В. С. Маций. – Краснодар : КубГАУ. – 2023. – 520 с.
13. Кацко, Д. И. Имитационное моделирование в расчетах устойчивости оползневых грунтов / Д. И. Кацко, Е. В. Кузнецов // Мелиорация. – 2024. – № 2 (108). – С. 5–12.
14. Кацко, Д. И. Геотехническая безопасность и субъективная оценка факторов оползневого риска / Д. И. Кацко, В. С. Маций // Проблемы управления безопасностью сложных систем : материалы XXVI Междунар. конфер., 19 дек. 2018 г., г. Москва / под общ. ред. А. О. Калашникова, В. В. Кульбы. – Москва : ИПУ РАН, 2018. – С. 313–318.
15. Сооружения подпорные. Правила проектирования : СП 381.1325800.2018. – Введ. 24.01.2019. – Москва : Стандартиформ, 2018. – 104 с.

Поступила 20 января 2025 г.