

МОРФОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ СУФФОЗИОННЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА В ВОТКИНСКОМ РАЙОНЕ УДМУРТИИ

© 2026 г. И. Е. Егоров^{1, *}, И. В. Глейзер¹, И. И. Григорьев^{1, **}, А. Г. Казаков¹

¹Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*E-mail: egorov.i53@mail.ru

**E-mail: ivangrig@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.10.2024

После доработки 26.07.2025

Принята к публикации 17.10.2025

Аннотация. Суффозия может сама по себе вызывать негативные последствия и, кроме того, нередко она провоцирует такие процессы, как оврагообразование и оползание. Учитывая эти обстоятельства и тот факт, что ее изученность на территории Удмуртии крайне мала (имеются лишь единичные сообщения), необходимость исследований этого процесса вполне очевидна. Изложены методы и результаты полевых наблюдений за развитием процессов суффозии, проведенных на двух стационарах, расположенных в Воткинском районе Удмуртской Республики. В пределах обоих участков суффозионные формы развиты на перигляциальных отложениях (суглинках, супесях и песках), видимая мощность которых составляет более 12 м на абразионном уступе водохранилища и более 20 м на бортах балки. Наблюдения включали в себя высокоточную тахеометрическую съемку контуров и высотных отметок рельефа днищ суффозионных просадок с заранее закрепленных грунтовых реперов и съемку с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Это позволило оценить изменение объемов суффозионных просадок и осажденного в зоне осушки водохранилища вынесенного тоннельной эрозией материала. Выявлено значительное количество суффозионных образований, которые можно подразделить на несколько морфологических типов. Первый тип – округлые в плане просадки диаметром от 0.5 до 2.5 м и глубиной от 0.15–0.20 до 1.5 м, встречающиеся одиночно или группами на небольшом расстоянии от бровки балки. На склоне балки они сопровождаются обычно суффозионными нишами и со временем переходят в оползни или овраги. Второй тип – вытянутые линейные просадки длиной первые десятки метров и глубиной от 0.20–0.30 до 1.5 м, шириной от 0.60–0.80 до 2.5 м. У подножий висячих устьев этих форм в зоне осушки периодически формируются конусы выноса радиусом до 2 м. Третий тип – суффозионные формы, внешне напоминающие овраг, глубиной более 2.5 м и шириной более 10 м. Ежегодный прирост объема такого оврага составляет в среднем 10 м³. Максимальный прирост наблюдался после зимы 2021 г. – 105 м³. Четвертый тип – суффозионные конусы выноса в висячих створах балок без видимых (пока) просадок в их днищах. Такие конусы выноса стали появляться в последние 2 года. Материалы тахеометрических съемок позволили выявить изменение контуров просадок и высотных отметок рельефа по проложенным продольным и поперечным профилям. В целом в береговой зоне водохранилища проявление процессов суффозии усиливается, в районе д. Фертики суффозионные образования более стабильны.

Ключевые слова: суглинки; просадки грунта; бортовой отпор; отседание; береговые процессы; конус выноса

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20003, <https://rscf.ru/project/25-27-20003>

Ссылка для цитирования: Егоров И. Е., Глейзер И. В., Григорьев И. И., Казаков А. Г. (2026) Морфология и особенности развития суффозионных форм рельефа в Воткинском районе Удмуртии. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 57. № 1. С. 43–57. <https://doi.org/10.7868/S2949179726010038>

MORPHOLOGY AND FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF SUBSURFACE EROSION LANDFORMS IN THE VOTKINSK REGION OF UDMURTIA

I. E. Egorov^{a, #}, I. V. Gleyzer^a, I. I. Grigorev^{a, ##}, and A. G. Kazakov^a

^a*Udmurt State University, Izhevsk, Russia*

[#]*E-mail: egorov.i53@mail.ru*

^{##}*E-mail: ivangrig@yandex.ru*

Received October 30, 2024

Revised July 26, 2025

Accepted October 17, 2025

Abstract. Subsurface erosion can cause negative consequences by itself and, in addition, it often provokes processes such as ravine formation and landslide. Given these circumstances and the fact that its study on the territory of Udmurtia is extremely small (there are only isolated reports), the need for research on this process is quite obvious. The article presents the methods and results of field observations of subsurface erosion development, conducted at stations located in the Votkinsk District of the Udmurt Republic. Within both sites, subsurface forms are developed on periglacial deposits (loams, sandy loams and sands), the apparent thickness of which is more than 12 m on the abrasive ledge of the reservoir and more than 20 m on the sides of the gully. The observations included high-precision tachometric surveys of contours and elevation relief of the bottoms of subsurface erosion tunnels from pre-fixed ground reference points and surveys from unmanned aerial vehicles (UAVs). This made it possible to estimate the change in the volumes of subsurface erosion subsidence and the material deposited in the reservoir drying zone by tunnel erosion. A significant number of subsurface erosion formations were revealed, which can be subdivided into several morphological types. The first type is rounded subsidences with a diameter of 0.5 to 2.5 m and a depth of 15–20 cm to 1.5 m, occurring singly or in groups at a short distance from the gully edge. On the slope of the gully, they are usually accompanied by subsurface erosion niches and eventually turn into subsurface erosion landslides or ravines. The second type is elongated linear subsidences a few tens of meters long and from 20–30 cm to 1.5 m deep. At the foot of the hanging mouths of these forms, fans with a radius of up to 2 m are periodically formed in the drying zone. The third type is subsurface erosion shapes that look like a ravine, with a depth of more than 2.5 m and a width of more than 10 m. The annual increase in the volume of such a ravine is on average 10 m³. The maximum increase was observed after the winter of 2021 – 105 m³. The fourth type is subsurface erosion fans in the hanging sides of gully without visible (so far) subsidence in their bottoms. Such fans have begun to appear in the last two years. The materials of total station surveys made it possible to identify changes in the contours of subsidence and elevation of the relief along the elongated longitudinal and transverse profiles. In general, in the coastal zone of the reservoir, the manifestation of subsurface erosion processes is intensified; in the area of the village of Fertiki, subsurface erosion formations are more stable.

Keywords: loams; soil subsidence; side resistance; toppling; coastal processes; alluvial fan

Funding. The study was funded by the Russian Science Foundation, Project № 25-27-20003. <https://rscf.ru/project/25-27-20003>

For citation: Egorov I. E., Gleyzer I. V., Grigorev I. I., and Kazakov A. G. (2026) Morphology and features of the development of subsurface erosion landforms in the Votkinsk region of Udmurtia. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 57. No. 1. P. 43–57 (in Russ). <https://doi.org/10.7868/S2949179726010038>

1. ВВЕДЕНИЕ

Суффозией обычно называют вынос мелких обломочных частиц и растворенных веществ потоками грунтовых вод, фильтрующихся в толще тонкодисперсных пород. Таким образом, процесс суффозии разделяют на две составляющие — механическую и химическую. Применительно к собственно суффозии роль выщелачивания должна быть только предпосылкой развития механического размыва в толще грунтов. Если процессы выщелачивания не сопровождаются выносом обломочных частиц, то они должны быть отнесены к карсту. И. С. Шукин (1964) ограничивал распространение процесса в основном семиаридными районами, выделяя две группы суффозионных образований. В первом случае в составе горной породы диффузно распределено растворимое вещество, вынос которого увеличивает пористость грунта и дает возможность активной циркуляции грунтовых вод. Вторая группа включает формы, возникающие в просадочных макропористых грунтах. Возникающие при просадках трещины размываются впоследствии дождевым или талым стоком.

Уже к середине прошлого века сходные образования и процессы были обнаружены и описаны далеко за пределами семиаридных районов — в Белоруссии, на Украине, в Среднем Поволжье (Дедков, 1977).

Оказалось, что наличие в грунтах растворимых соединений не является необходимым условием развития процесса, поэтому, по мнению А. П. Дедкова (1970, 1977), наиболее точно механизм процесса отражает термин “тоннельная эрозия”, не получивший, правда, такого же широкого применения, как термин “суффозия”.

Наиболее детально механизм суффозии вне пределов семиаридных территорий был рассмотрен В. В. Батыром (1953) на примере Среднего Поволжья и назван им суффозионной деятельностью талых и ливневых вод. Позднее в этом же регионе эти явления были описаны А. В. Ступишиным (1967) и А. П. Дедковым (1970).

Попытка выделения ряда зон и выявления общих закономерностей развития суффозионных процессов в пределах Русской равнины была предпринята К. Я. Казаковым (1981). В частности, он отмечает, что суффозионные явления обычны на Русской равнине, и если на поверхности они отсутствуют, то это еще не означает, что не существует условий для их развития в толще породы. По его мнению, суффозия имеет повсеместное развитие в четвертичных отложениях лесной зоны в связи с процессами оподзоливания почв. По-видимому, в данном случае имеется в виду проявление химической денудации в условиях промывного водного

режима почв как фактора возможного начала собственно суффозии. При этом он указывает, что в основном в лесной зоне суффозия выражена слабо, имеет локальное развитие и ослабевает в настоящее время.

Как уже отмечалось, суффозией обычно называют вынос мелких обломочных частиц и растворенных веществ потоками грунтовых вод, фильтрующихся в толще тонкодисперсных пород. На наш взгляд, более конкретна трактовка термина “суффозия” В. Д. Ломтадзе (1977) — “это механическое разрушение и вынос вещества дисперсных горных пород подземными водами”. При этом не исключаем и сопутствующий механическому выносу растворенных веществ, поскольку в результате фильтрации горных пород подземными водами некоторая их часть растворяется, и воды всегда в той или иной степени бывают минерализованы.

В целом суффозии посвящено мало специальных работ. Обычно она упоминается в связи с развитием других геоморфологических процессов в качестве сопутствующего явления или важного фактора. Чаще всего указывается на связь суффозии с развитием оврагов (Дедков, 1970; Селикова, 1977; Полунин, 1989; Машков, 2006; Рыжов, 2015 и др.) и оползней (Печеркин и др., 1980, Полунин, 1989; Назаров, 2008 и др.). При этом многие справедливо отмечают, что суффозионные формы с трудом поддаются количественному учету.

Развитие и распространение суффозии определяется рядом факторов, которые иногда оцениваются неоднозначно. Так, И. А. Печеркин (1969) считает, что одним из основных условий, необходимых для развития суффозии, является наличие склонов средней и малой крутизны. Аналогично, Г. В. Полунин (1989) отмечает, что следы эрозионной деятельности подземных вод (на Сахалине) встречаются только в виде пологих ложбин — деллей, вытянутых по направлению к основным водотокам. К. Я. Казаков (1981), напротив, утверждает, что для механической суффозии наиболее благоприятен сильно расчлененный рельеф с большими перепадами гидродинамического напора, в то время как для развития химической суффозии более благоприятны равнинный рельеф и незначительная овражная расчлененность. Следует только заметить, что химическая суффозия без механической относится уже к карсту. Просадки грунта, не сопровождаемые впоследствии механической денудацией, не должны быть отнесены к суффозии.

В целом расположение суффозионных образований в пространстве более или менее закономерно. Они чаще всего приурочены к тыловым швам оползневых тел (Печеркин и др., 1980; Назаров, 2008 и др.), бортам оврагов (Дедков, 1970, 1977;

Назаров, 2008), верхней части террасовых и абразионных уступов (Дедков, 1977; Машков, 2006).

Из других факторов развития суффозии всегда особо выделяются состав поверхностных горных пород, климато-ландшафтная обстановка и хозяйственная деятельность человека.

Состав пород важен, прежде всего, в связи с трещинообразованием. Наибольшее значение для рыхлых пород имеют трещины высыхания и вызванные промерзанием, а также типичная для них столбчатая отдельность (Дедков, 1977; Агеев, 1980), обеспечивающие возможность просачивания талых и ливневых вод. Образование трещин на крутых склонах балок и абразионных уступов параллельно бровке может быть связано также с эффектом бортового отпора вследствие резкого перепада геостатического давления. Это явление называют также топографической трещиноватостью (Оллиер, 1987). В условиях постоянного подрезания склонов, трещины могут возникать также вследствие разуплотнения пород и увеличения скорости их смещения ближе к бровке (Агафонов, 1986). Замечено, что особенно интенсивно процессы суффозии протекают в зоне распространения трещин бортового отпора (Двинских и др., 1981). И. А. Печеркин (1969) к основным условиям относит также определенный гранулометрический состав пород, неоднородность породы и хороший дренаж, обеспечивающий необходимые скорости движения воды и градиенты напора.

Развитие процессов суффозии активизируется в периоды большого поступления воды в грунт, особенно во время снеготаяния.

Геоморфологами установлена явная закономерность связи суффозии с характером растительности. А. П. Дедков (1970, 1977) отмечает, что формы тоннельной эрозии встречаются, как правило, на безлесных поверхностях. В умеренной гумидной зоне тоннельная эрозия широко развита лишь в областях, где естественный ландшафт изменен сельскохозяйственной деятельностью человека. По наблюдениям Г. В. Полунина (1989), деятельность подземной эрозии наиболее ярко выражена на склонах, лишенных растительности. А. Ф. Машков (2006) связывает активизацию суффозионных процессов на отдельных участках правого склона долины р. Камы с увеличением антропогенной нагрузки.

Процессы суффозии и связанные с ними формы рельефа в пределах Удмуртии распространены достаточно широко, однако при этом они практически не изучены. Имеются лишь единичные эпизодические наблюдения за проявлением суффозии, или же этот процесс просто упоминается как возможный фактор развития овражной эрозии

или возникновения оползней. Отсутствие интереса к суффозионным процессам было обусловлено, на наш взгляд, несколькими причинами. Во-первых, недооценкой их роли в современном рельефообразовании на территории Удмуртии. Во-вторых, трудностью выявления и количественного учета образованных форм, особенно на начальных стадиях исследования и выбором стационаров. Суффозионные формы рельефа преимущественно небольшие, их трудно выявить даже на аэрофотоснимках, не говоря уже о топографических картах. В-третьих, они часто очень динамичны, быстро разрабатываются стоком и через небольшие промежутки времени морфологически напоминают овраги, и зачисляются, соответственно, в овражные формы. Так, А. Ф. Машков (2006) в 2003 г. наблюдал в период весеннего снеготаяния формирование двух цепочек суффозионных просадок овальной формы глубиной до 2.5 м, которые сразу же подверглись размыву и преобразовались в овраги. В целом же роль суффозии в развитии овражной эрозии остается недооцененной. При этом отмечается общая активизация суффозионных процессов на правом склоне долины р. Камы (Машков, 2006) и на отдельных участках правобережья Воткинского водохранилища в последнее время. Насколько велика может быть роль суффозии в переработке берегов водохранилищ, отметил, в частности, Д. П. Финаров (1974). По его подсчетам, на Красноярском водохранилище в районе с. Новосёлово в 1971 г. переработка берегов за счет суффозионного выноса материала была в три раза больше, чем за счет абразии.

Интересным выглядит обзор мирового изучения суффозии за конец XX-го — начало XXI в., приведенный в журнале *Earth-Science Reviews* (Bernatek-Jakiel, Poesen, 2018). На карте мира показаны точки, где суффозия наблюдалась (79 точек) и где изучалась (151 точка). На территории России на этой карте отмечена только одна точка на юге Западной Сибири. Авторы публикации отмечают сходные проблемы, возникающие при изучении суффозии, подчеркивают необходимость подобных исследований.

Настоящее исследование направлено на изучение морфологии суффозионных форм, закономерностей их развития и предварительную оценку роли процессов суффозии в динамике современного рельефа на основе стационарных наблюдений.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Стационарные полевые наблюдения суффозионных процессов нами были начаты с 2020 г. в Воткинском районе Удмуртской Республики на двух

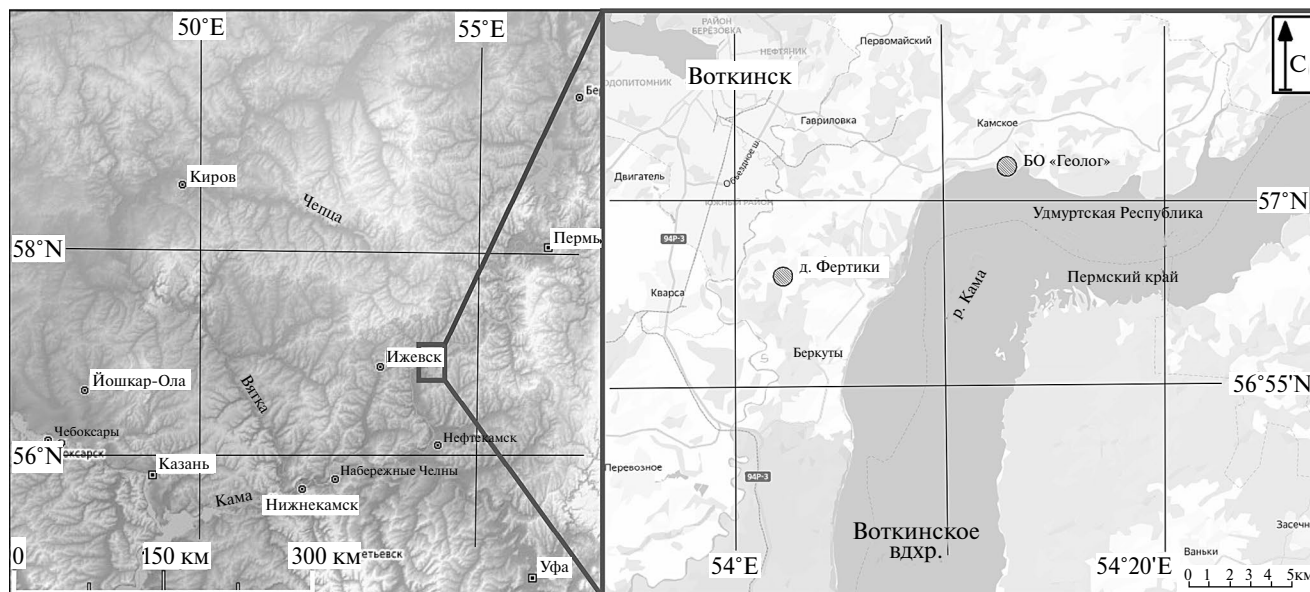


Рис. 1. Расположение участков изучения суффозионных процессов (картографическая основа OpenStreetMap).

Fig. 1. Location of sites for the study of subsurface erosion processes (the cartographic basis of OpenStreetMap).

участках. Первый расположен на правом берегу Воткинского водохранилища возле базы «Геолог», второй — в прибрежной части балки возле д. Фертики (рис. 1). В пределах обоих участков суффозионные образования развиты на перигляциальных бескарбонатных делювиально-солифлюкционных и делювиальных желтовато-коричневых или светло-коричневых лёссовидных суглинках, переслаивающихся с супесями и мелкозернистыми песками. В составе этих отложений заметно преобладание частиц двух фракций — 0.5–0.25 мм (32.8–35.2%) и 0.25–0.1 мм (38.6–40.5%). Остальная часть приходится в основном на частицы <0.1 мм — от 15.1 до 22.8%. Коэффициент пористости пород — 0.61–0.62, плотность — 1.92–1.96 г/см³, коэффициент фильтрации — 2.0–2.2 м/сут. Видимая мощность толщи — >12 м на абразионном уступе водохранилища и >20 м на бортах балки. Крутизна абразионного берегового уступа на водохранилище — 55–60°, верхние 2–3 м практически вертикальны. При высоком уровне воды в летнее время выше уреза также образуется почти вертикальный уступ высотой 1.5–2 м. Длина участка берега, сложенного этими рыхлыми осадочными породами, >0.5 км. Среднегодовые скорости разрушения абразионного уступа — 1.12 м/год, максимальные — до 2.2 м/год. Данные получены авторами в результате мониторинга береговых процессов на водохранилище, начатого в 2004 г. По мере отступления уступа расчет его высота — начиная с 2004 г. она увеличилась почти на 4 м. Склон выше уступа пологий, ровный, крутизной 2–3°.

Стационарные наблюдения в районе д. Фертики проводились на правом борту балки (левый — полностью залесен). В верхней и средней частях балки ее глубина составляет 25–30 м, в нижней постепенно снижается до 10 м. Крутизна склонов балки — 30–35°, крутизна коренного склона, в который врезана балка, — 2–4°. Длина балки около 800 м. Склон возле бровки в настоящее время покрыт молодыми осинами и соснами. Это связано с тем, что процессы суффозии после вырубки леса и распашки территории стали развиваться активно в прибрежной части, и границы поля стали постепенно отодвигаться от бровки. При этом сформировавшиеся суффозионные формы сохранились и даже продолжают в настоящее время развиваться.

На водохранилище стационарные наблюдения проводились 2 раза в год — в середине апреля и в конце сентября. Особо ценными можно считать весенние наблюдения. Во-первых, весной часто вскрываются суффозионные тоннели и пустоты, и можно оценить их размеры. Впоследствии выходы тоннелей и пустот обычно закрываются размокшими породами. Во-вторых, продукты механической суффозии выносятся в зону осушки водохранилища, образуя конусы выноса у подножия абразионного уступа, что позволяет оценить достаточно точно объем вынесенного за весну материала. После подъема уровня воды в водохранилище все суффозионные конусы выноса размываются.

На водохранилище проводилась тахеометрическая съемка с заранее закрепленных грунтовых реперов, расположенных на небольшом расстоянии

от суффозионных просадок. Определялись плановые очертания суффозионных западин и изменения, происходящие в их днищах. Точность используемого электронного тахеометра EFT TS1 высокая, составляет $2 \text{ мм} + 2 \text{ ppm}$ (режим “призма”). Вследствие динамики лесной подстилки в днищах суффозионных просадок годовые изменения высотных отметок $< 1 \text{ см}$ нами не учитывались. В плане суффозионные формы имеют плавные очертания, поэтому точность выше 1 см не требуется. В качестве реперов использовались стержни из арматуры, забитые в грунт. Координаты реперов ежегодно проверялись с помощью высокоточного навигационного оборудования. Съемка проводилась с высоты 30 м с использованием БПЛА DJI Phantom 4, величина перекрытия снимков составила от 70 до 80% . Привязка снимков выполнена по наземным маркерам, их координаты определялись ГНСС-приемником EFT M1-plus в РТК-режиме в МСК (точность $5 \text{ мм} + 0.5 \text{ ppm}$). Обработка данных аэрофотосъемки проведена в лицензионных программах Agisoft Metashape и “Кредо Топография”. Точность используемых для расчетов ортофотопланов составляет $1.2\text{--}1.5 \text{ см/пиксель}$. На основе полученной цифровой модели местности геодезическими методами был произведен расчет объема вынесенного грунта в программе “Кредо Топография”. Материалы, полученные с использованием БПЛА, позволили вычислить для наиболее крупного суффозионного образования его линейный и площадной приросты и изменение объема. Эти параметры определены для двух промежутков времени — за весь период снеготаяния и первую половину весны (до второй половины апреля) и теплое время года с середины апреля до конца сентября — начала октября.

Детальная тахеометрическая съемка была выполнена на четырех линейных суффозионных формах; в других случаях при обследовании зоны осушки фиксировались проявления суффозии с замером рулеткой и фотографированием конусов выноса, количество которых в разные годы было неодинаковым, также их размеры заметно изменялись. Механический вынос в ряде случаев был не ежегодным.

На Фертиковской балке наблюдения проводились 1 раз в год, в конце сентября — начале октября. Детальная тахеометрическая съемка выполнена на семи суффозионных формах. Остальные обнаруженные суффозионные формы были сфотографированы и измерены. Всего на правом борту балки было выявлено и обследовано 15 суффозионных форм, и одна — на левом, залесенном борту.

Построенные по данным съемок изображения суффозионных форм рельефа с последующим их

совмещением дают представление о динамике их развития.

Обычно полевые работы по изучению этих образований рекомендуют организовывать в летнее время (Пастушкова, 1987), поскольку западины весной и осенью могут быть заполнены водой. Однако наш опыт показывает, что эта рекомендация подходит не для всех условий. Особенно это касается береговых зон водохранилищ, где только весной в зоне осушки можно получить количественные данные о величине механической денудации, связанной с развитием суффозии.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На обследованных нами территориях было обнаружено значительное количество суффозионных образований, отличающихся как по морфологии и динамике, так и по конечному результату развития процесса. Вопросы классификации суффозии были рассмотрены в ряде работ, но наиболее детально морфологические типы суффозионных образований были выделены В. П. Хоменко (2006). Он выделяет формы поверхностные, присклоновые и подземные. К первым относятся суффозионные воронки, впадины, блюдца, суффозионные конусы выноса, ко вторым — суффозионные ниши и оползни, к третьим — подземные полости и галереи. Нами на стационарах были обнаружены все три основных типа, нередко — в определенных сочетаниях друг с другом.

Наиболее распространенными оказались округлые в плане просадки диаметром от 0.5 до 2.5 м и глубиной от $0.15\text{--}0.20$ до 1.5 м . У наиболее крупных просадок по всему периметру борта обрывистые, вертикальные. При этом днища просадок задернованные, с ненарушенным почвенным покровом (рис. 2). Такие просадки встречаются одиночно или группами на небольшом удалении от бровки балки. Группы просадок располагаются либо параллельно бровке балки, либо перпендикулярно ей. В первом случае просадки отделяют относительно небольшой блок горных пород от прибровочного участка склона. Скапливающаяся в просадках вода просачивается между блоком и склоном, выносит часть материала, и блок впоследствии смещается вниз. Высота таких блоков составляет всего $2\text{--}3 \text{ м}$. Тоннель при этом не формируется, но на склоне балки образуется небольшая суффозионная ниша. Подобный механизм развития процесса был ранее детально описан Г. В. Полуниным (1983, 1989). Оползневой цирк шириной 15 м с сохранившимся внизу телом оползня обнаружен нами на правом борту балки, там же найдены еще два подобных образования в разных стадиях смещения. Эти блоки в настоящее время стабилизированы, видимых



Рис. 2. Суффозионная просадка по правому борту балки у д. Фертики Воткинского района Удмуртской Республики (фото И. Е. Егорова).

Fig. 2. Subsurface erosion sinkhole on the right side of the gully near the village of Fertiki in the Votkinsky district of Udmurt Republic (photo I. Egorov).

подвижек не обнаружено, что, возможно, вызвано залесением территории. Поскольку размеры блоков пород невелики, корневая система деревьев, видимо, способна удерживать их в прежнем положении.

Во втором случае на месте просадок со временем образуется эрозионная форма, внешне напоминающая овраг. При этом в сравнении с обычными эрозионными оврагами нетрудно найти ряд существенных отличий. Прежде всего, в вершинах таких “оврагов” отсутствуют какие-либо следы и признаки поверхностного стока. На прилегающих к вершинам участках совершенно не нарушены почвенно-растительный покров и лесная подстилка. В вершине отсутствует водобойная ниша. Сама вершина округлая и достаточно широкая, стенки на всем протяжении практически вертикальные, тальвег очень крутой. Длина таких

оврагов небольшая, несколько десятков метров, устье плавно переходит в склон балки. В устьевой части могут встречаться отдельные пласты сохранившейся дернины. Последнее обстоятельство также указывает на то, что дернина, не подвергаясь размыву, сместилась вниз при обрушении тоннеля и впоследствии была сдвинута. На правом борту балки обнаружены три таких суффозионных двухвершинных овражка. Глубина их в вершине — 2–2.5 м, ширина в вершинах — 3–4 м.

Вершины суффозионных оврагов в настоящее время стабильны. Что касается отдельных суффозионных округлых форм, то даже в условиях залесенности стационарные наблюдения выявили некоторую динамику. Самая значительная просадочность в них за весенний период была отмечена в 2023 г. и составила 4 см в наиболее глубоких (>1 м) формах. Обильные дожди в июне и августе



Рис. 3. Вытянутая линейная просадка на берегу Воткинского водохранилища (фото И. Е. Егорова).

Fig. 3. Elongated linear subsidence on the shore of the Votkinsk reservoir (photo I. Egorov).

2024 г., более чем вдвое превышающие месячные нормы, привели к просадкам от 3 до 7 см в центре днищ двух из семи суффозионных образований, и 30 см ближе к бровке балки одной из них. Во все другие годы изменения отметок днищ суффозионных форм в летний период не наблюдались.

Второй по встречаемости поверхностной формой суффозионных образований оказались вытянутые линейные просадки длиной несколько десятков метров, глубиной от 0.20–0.30 до 1.5 м, шириной от 0.60–0.80 до 2.5 м (рис. 3). Поперечный профиль этих форм мульдобразный, симметричный, почвенный покров не нарушен как в днищах, так и по бортам линейных форм, следы притока воды к вершинам и стока воды в самих формах отсутствуют. Этот тип широко представлен на правобережье Воткинского водохранилища и в единственном случае — на левом борту Фертиковской балки. В первом случае он представлен

сериями параллельных просадок, расположенных недалеко друг от друга и напоминающих делли. Подобный тип просадок на примере Сахалина описан Г. В. Полуниным (1989), который считает делли результатом эрозионной деятельности подземных вод (т.е. суффозии). Вопрос о происхождении этих форм рельефа является дискуссионным (их возникновение объясняли процессами эрозии, солифлюкции, термокарста и т.д.). Что касается возраста деллей, то в пределах востока Русской равнины наблюдаются как реликтовые плейстоценовые, так и современные делли. Г. П. Бутаков (1986) отмечал, что сейчас делли на данной территории образуются на участках с нарушенным растительным покровом, т.е. антропогенно спровоцированы, как и суффозия. Устье деллей открывается на абразионном уступе. Как и для округлых в плане форм, наибольшее изменение высотных отметок за весенний период составило в 2023 г. 4 см в средней



Рис. 4. Вынос материала по трещинам и образование конуса выноса у подножия абразионного склона на берегу Воткинского водохранилища (фото И. Е. Егорова).

Fig. 4. The removal of material through cracks and fan formation at the foot of the eroded slope on the shore of the Votkinsk reservoir (photo I. Egorov).

и верхней частях наиболее крупного линейного суффозионного образования. Кроме того, в нем начала формироваться вторая вершина. В нижней части просадки изменения не наблюдались.

В отдельные годы у подножий висячих уступов подобных форм образовывались небольшие конусы выноса с радиусом до 1.5–2 м. Сток и вынос материала из линейных форм происходят по трещинам, а не тоннелям, они хорошо видны на обнаженных абразионных уступах (рис. 4). Нижняя граница таких трещин располагается обычно на глубине 2–3 м от поверхности. Ручьи, изливающиеся по трещинам, небольшие, почти не вызывают размыва нижележащих участков склона, более того, часть вынесенного материала осаждается на самом абразионном уступе и впоследствии смывается дождями. Соответственно, размеры конусов выноса в целом можно считать равными объему

суффозионного выноса. В последние годы случаи формирования конусов выноса участились, что отчасти послужило причиной начала стационарных наблюдений за суффозией. Следует добавить, что если происхождение деллей было и не суффозионным, то сейчас именно этот процесс является основным фактором их развития.

Если в первые годы наблюдений никаких изменений в линейных просадках за летний период не происходило, то аномальные осадки июня–августа 2024 г. привели к неравномерному снижению отметок днищ в двух линейных формах от 2 до 6 см на разных их участках.

Третьей разновидностью суффозионных образований являются формы, изначально внешне напоминающие овраг, образовавшиеся на поверхности пологих склонов. Рост вершины такого оврага происходит практически сразу после образования



Рис. 5. Устье суффозионного оврага с конусом выноса на берегу Воткинского водохранилища (фото И. Е. Егорова).
Fig. 5. The mouth of a subsurface erosion ravine with fan formation on the shore of the Votkinsk reservoir (photo I. Egorov).

суффозионного тоннеля без формирования предшествующих цепочек просадок. Рост вершины идет параллельно с переработкой абразионного уступа водохранилища, но с более высокими скоростями. Тоннель обычно вскрывается весной в активную стадию снеготаяния. На таком суффозионном овраге нами были проведены наблюдения с 2020 г. (рис. 5, 6). Глубина заложения тоннеля составляет 2.5 м, диаметр около 0.5 м. Характеристики прироста оврага приведены в табл. 1. Исходные данные для таблицы были получены в апреле 2020 г. и включали только расположение контуров оврага. Соответственно, к осени того же года оказалось возможным определить только его линейный и площадной приросты. Использование БПЛА осенью 2020 г. позволило вычислить исходный для последующих расчетов объем суффозионного оврага.

Это наиболее активная из изученных нами суффозионная форма рельефа с нестабильной

динамикой. Наибольший прирост вершины оврага наблюдался в 2021 г. — он составил примерно 8 м, из них 7.8 м приходится на весну и только 0.2 на лето — начало осени (табл. 1). Этот же год дал максимальный площадной прирост — 87.1 м², из которых 82.2 м² пришлось на весенний период. Начиная с октября 2020 г. до апреля 2024 г. объем оврага увеличился на 154 м³, из них 114 м³ приходится также на 2021 г. (105 м³ — прирост за весну, 9 м³ — за период с мая до конца сентября). Такие высокие темпы прироста связаны, на наш взгляд, с интенсивностью снеготаяния. Период снеготаяния в 2021 г. составил всего 20, вместо обычных 30–35 дней (табл. 2). Общие запасы воды в снеге, как показывают данные таблиц, оказывают гораздо меньшее влияние на развитие суффозии, чем интенсивность снеготаяния. Приведенные данные характеризуют объем суффозионного выноса, и он оказывается весьма значительным, по крайней

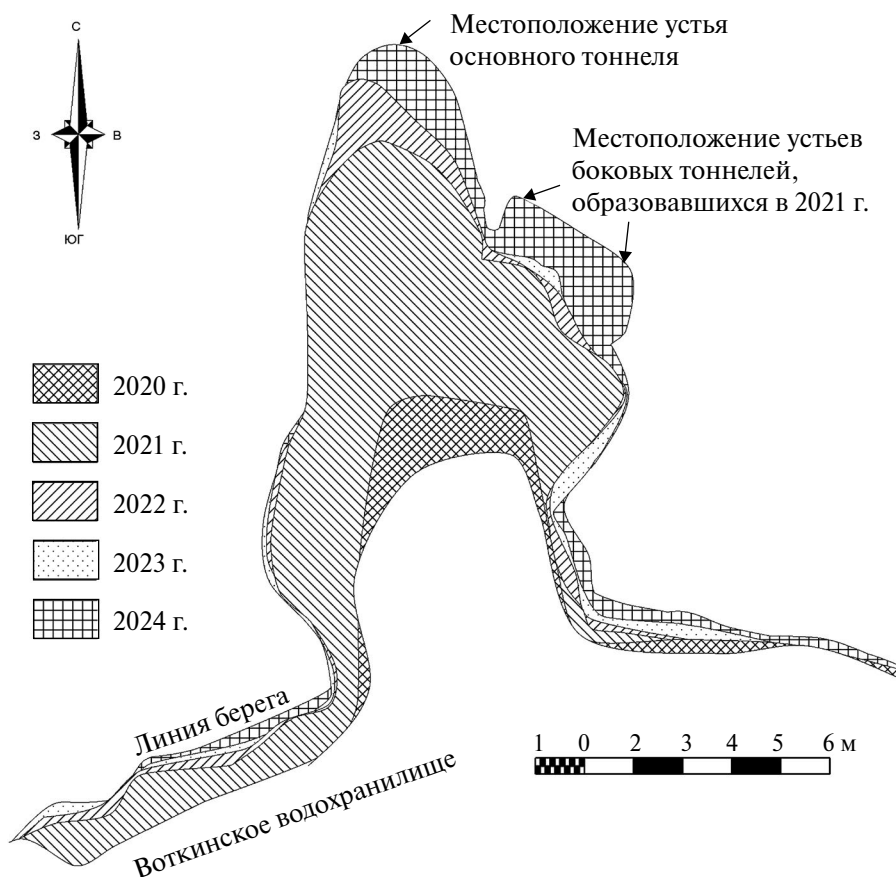


Рис. 6. Схема развития суффозионного оврага на берегу Воткинского водохранилища.

Fig. 6. The scheme of changing the contour of the subsurface erosion ravine and the coastal edge of the Votkinsk reservoir.

мере, для данного участка мелководья Воткинского водохранилища.

В целом на весну 2021 г. приходится >92% годового прироста всех параметров оврага. Близкие в процентном отношении значения продуктивности суффозионных процессов — около 90% за весну и 10% за май—сентябрь получены и для 2022 г.

Наиболее значительные изменения, произошедшие в 2021 г., вызваны еще и тем, что помимо основного вершинного тоннеля образовалось еще два небольших боковых по левому борту, кровля которых почти сразу обрушилась. Образование дополнительных тоннелей, вероятно, также обусловлено высокой интенсивностью снеготаяния.

Последние 2 года прирост суффозионного оврага стабилизировался и составлял всего 5 м³ за весну. При этом доля летнего периода заметно выросла, а за лето 2024 г. приросты как линейный и площадной, так и объемный впервые превзошли весенние показатели (табл. 1), что вызвано обильными атмосферными осадками летнего периода, вдвое превышающими среднегодовые нормы (табл. 2).

Эти образования по ряду признаков заметно отличаются как от обычных оврагов, так и суффозионных, образующихся на склоне балки. Прежде всего четко видно отсутствие поверхностного стока с прилегающих к оврагу участков. Весной в вершине вскрывается тоннель с водным потоком. Водобойный колодец отсутствует. Тальвег вообще не просматривается. Сверху днище суффозионной формы завалено крупными блоками рыхлых пород с не размытой дерниной, между которыми осуществляется сток. Водный поток, насыщенный взвешенными наносами, виден только в устьевой части “оврага”. Причем он настолько маломощный, что не способен размыть даже непрочные склоновые отложения и выработать продольный профиль до базиса эрозии. Вместе с тем происходит насыщение водой упавших сверху суглинков и супесей до жидкотекучего состояния. Вынос этого материала определяет конечный результат такого стока — в устье таких форм могут формироваться мощные конусы выноса (рис. 7).

Описание подобных суффозионных овражных форм чаще всего встречается в литературных

Таблица 1. Данные тахеометрической съемки суффозионного оврага на участке берега Воткинского водохранилища

Table 1. Data from the total station survey of the subsurface erosion ravine on the shore of the Votkinsk reservoir

Дата наблюдений		Линейный прирост, м	Площадной прирост, м ²	Объем (прирост), м ³
год	месяц			
2020	октябрь	2.2	13.3	156
2021	апрель	7.8	82.2	261(105)
	октябрь	0.2	4.9	270(9)
2022	апрель	2.1	9.8	295(25)
	сентябрь	0.4	1.2	297(2)
2023	апрель	0	4.7	302(5)
	сентябрь	0	2.1	305(3)
2024	апрель	0.3	10.1	310(5)
	сентябрь	1.0	12.4	316(6)

Таблица 2. Некоторые гидрометеорологические показатели по данным Воткинской метеостанции

Table 2. Some hydrometeorological indicators according to the Votkinsk meteorological station

Год	Запасы воды в снеге на начало месяца, мм				Продолжительность снеготаяния, дни	Количество осадков за летний период, мм		
	январь	февраль	март	апрель		июнь	июль	август
2020	80	143	138	42	35	33.4	137.4	49.1
2021	68	94	125	84	20	41.9	121.8	34.4
2022	125	195	220	117	51	84.2	18.8	1.1
2023	137	144	160	0	23	32.6	50.0	42.3
2024	156	219	206	126	36	139.9	75.3	90.5

источниках – с формированием тоннеля и последующим обрушением кровли (Дедков, 1970; Салюкова, 1977; Рыжов, 2015 и др.), иногда без образования отдельных просадок или их цепочек на поверхности.

Наконец, нами отмечен еще один вариант проявления суффозии. Это суффозионные конусы выноса в створах балок. Такие проявления выноса материала достаточно обычны в береговой зоне водохранилища. Особенно заметно они стали проявляться в последние 2 года в створах балок, в которых по мере разрушения абразией берега, оказались вскрытыми почти полностью толщи пролювия. Вынос материала осуществляется в области контакта так называемого балочного аллювия и перекрывающих его толщ. Пока вынос материала не сопровождается образованием просадок в днищах балок, но, по-видимому, это просто вопрос времени. Объем вынесенного материала в створах двух таких балок не превысил 0.5 м³.

В целом в береговой зоне водохранилища процессы суффозии усиливаются. Это, на наш взгляд, связано с отступанием береговой линии и увеличением вследствие этого высоты абразионного уступа. Склон становится менее устойчивым, растет эффект бортового отпора, возникают большие градиенты и скорости движения грунтовых вод. Суффозионные образования в районе д. Фертики более стабильны, что, по-видимому, вызвано появлением древесной растительности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования суффозионных форм рельефа и их динамики позволяют сделать следующие выводы.

1. Суффозионные процессы и связанные с ними формы рельефа широко распространены в Воткинском районе. Только в пределах двух стационаров нами обнаружено более 30 форм суффозионного рельефа, причем эти образования обнаруживают



Рис. 7. Конус выноса суффозионного оврага на берегу Воткинского водохранилища. Фото с БПЛА, апрель 2021 г. (фото И. И. Григорьева).

Fig. 7. Alluvial fan of a subsurface erosion gully on the shore of the Votkinsk Reservoir. UAV photo, April 2021 (photo I. Grigorev).

значительное разнообразие как по морфологии, так и по динамике процесса.

2. Все выявленные суффозионные формы рельефа развиваются на склоновых делювиально-солифлюкционных и делювиальных отложениях. Развитие суффозии привело к прекращению использования некоторых земель, но даже под пологом леса суффозия не прекратилась, хотя темпы ее в настоящее время невелики. Развитие лесного покрова позволило сохранить ранее сформировавшиеся формы, что позволяет оценить их разнообразие и роль в развитии бортов балки у д. Фертики. Можно утверждать, что именно суффозия являлась ведущим процессом переформирования бортов балки после активного освоения территории.

3. В настоящее время развитие суффозии на правобережье водохранилища заметно активизировалось. Это вызвано увеличением высоты

абразионного уступа по мере разрушения берега. С ростом высоты уменьшается устойчивость склона, особенно сложенного непрочными рыхлыми породами, увеличивается их трещиноватость и, как следствие, усиление фильтрации воды. Объем вынесенного суффозией материала в зону осушки может быть на отдельных участках очень значительным и сопоставимым с количеством материала, образованного процессами осыпания и обваливания.

4. Пути суффозионного выноса материала разнообразны. Это могут быть тоннели, трещины, подрусловый сток в днищах балок. Наибольший объем выноса материала связан с тоннелями. Вынос материала по трещинам не так значителен, но встречается гораздо чаще.

5. В целом наиболее значительные изменения суффозионных форм наблюдаются в период снеготаяния. В частности на водохранилище заметные

изменения суффозионных форм за весь период с конца марта до начала октября не были зафиксированы вплоть до 2024 г., когда выпали аномальные по величине атмосферные осадки за короткий промежуток времени.

6. Полученные результаты позволяют оценить роль суффозии в переформировании существующего рельефа. Это очень активный процесс, особенно на территориях, подвергшихся значительной антропогенной нагрузке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонов Б.П. (1986) О природе смещения рыхлого покрова. *Известия АН СССР. Серия географическая*. № 4. С. 55–64.
- Ананьев Г.С. (1980) Процессы современной денудации в Восточных Карпатах. *Геоморфология*. № 1. С. 63–71.
- Батыр В.В. (1953) К вопросу о подкапывающей (суффозионной) деятельности талых и ливневых вод на территории Среднего Поволжья. *Ученые записки Казанского университета*. Т. 113. Кн. 2. С. 65–76.
- Бутаков Г.П. (1986) Плейстоценовый перигляциал на востоке Русской равнины. Казань: Изд-во Казанского ун-та. 144 с.
- Двинских С.А., Печеркин А.И., Лепихин А.П. (1981) Влияние водохранилищ на окружающую среду. Пермь: Изд-во Пермского ун-та. 119 с.
- Дедков А.П. (1970) Экзогенное рельефообразование в Казанско-Ульяновском Приволжье. Казань: Изд-во Казанского ун-та. 255 с.
- Дедков А.П. (1977) Тоннельная эрозия. Климатическая геоморфология денудационных равнин. Казань: Изд-во Казанского ун-та. С. 58–62.
- Казаков К.Я. (1981) Суффозионные явления на Русской равнине и смежных территориях. *Известия Всесоюзного географического о-ва*. Т. 113. Вып. 1. С. 40–48.
- Ломтадзе В.Д. (1977) Инженерная геология. Инженерная геодинамика. Л.: Недра. 479 с.
- Машков А.Ф. (2006) Влияние суффозионного процесса на устойчивость правого склона долины р. Камы. В сб.: *Проблемы флювиальной геоморфологии*. Ижевск: Научная книга. С. 95–97.
- Назаров Н.Н. (2008) Геодинамика побережий водохранилищ Пермского края. Пермь: ЗАО “Полиграфком-плект”. 152 с.
- Оллиер К. (1987) Выветривание. М.: Недра. 348 с.
- Пастушкова С.А. (1987) Опыт изучения рельефа лёссовых территорий по картографическим и аэрокосмическим материалам. *Геоморфология*. № 4. С. 36–41.
- Печеркин И.А. (1969) Геодинамика побережий камских водохранилищ. Пермь: Изд-во Пермского ун-та. 308 с.
- Печеркин И.А., Печеркин А.И., Каченов В.И. (1980) Теоретические основы прогнозирования экзогенных геологических процессов на берегах водохранилищ. Пермь: Изд-во Пермского ун-та. 86 с.
- Полунин Г.В. (1983) Экзогенные геодинамические процессы гумидной зоны умеренного климата. М.: Наука. 272 с.
- Полунин Г.В. (1989) Динамика и прогноз экзогенных процессов. М.: Наука. 232 с.
- Рыжов Ю.В. (2015) Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: ГЕО. 180 с.
- Салюкова Р.И. (1977) Развитие оврагов и их склонов в Южно-Минусинской котловине. В сб.: *Вопросы динамической геоморфологии*. Иркутск: Сиб. отд-ние АН СССР, Ин-т географии Сибири и Дальнего Востока. С. 55–81.
- Ступишин А.В. (1967) Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского ун-та. 291 с.
- Финаров Д.П. (1974) Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР. Л.: Энергия. 244 с.
- Хоменко В.П. (2006) Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС. 2006. 216 с.
- Шукин И.С. (1960) Общая геоморфология. Том. 1. М.: Изд-во МГУ. 615 с.
- Шукин И.С. (1964) Общая геоморфология. Том 2. М.: Изд-во МГУ. 564 с.
- Bernatek-Jakiel A., Poesen J. (2018) Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Sci. Rev.* Vol. 185. P. 1107–1128.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>

REFERENCES

- Agafonov B.P. (1986) On the nature of the displacement of loose cover. *Izvestiya AN SSSR. Seria geograficheskaya*. No. 4. P. 55–64 (in Russ).
- Anan'ev G.S. (1980) The processes of modern denudation in the Eastern Carpathians. *Geomorfologiya*. No. 1. P. 63–71 (in Russ).
- Batyr V.V. (1953) On the issue of subsurface (suffusion) activity of melt and rain waters in the territory of the Middle Volga region. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta*. T. 113. Kn. 2. P. 65–76 (in Russ).
- Bernatek-Jakiel A., Poesen J. (2018) Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Sci. Rev.* Vol. 185. P. 1107–1128.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.006>
- Butakov G.P. (1986) Pleistocene periglacial in the east of the Russian Plain. *Kazan': Kazanskii un-t (Publ.)*. 144 p (in Russ).
- Dedkov A.P. (1970) Ekzogennoe rel'efoobrazovanie v Kazansko-Ul'yanovskom Privolzh'e (Exogenous relief formation in the Kazan-Ulyanovsk Volga region). *Kazan': Kazanskii un-t (Publ.)*. 255 p (in Russ).
- Dedkov A.P. (1977) Tunnel erosion. In: *Klimaticheskaya geomorfologiya denudatsionnykh ravnin*. *Kazan': Kazanskii un-t (Publ.)*. P. 58–62 (in Russ).
- Dvinskih S.A., Pecherkin A.I., Lepihin A.P. (1981) Vliyaniye vodokhranilishch na okruzhayushchuyu sredu (The

- impact of reservoirs on the environment). Perm': Permskii un-t (Publ.). 119 p (in Russ).
- Finarov D.P. (1974) Dinamika beregov i kotlovin vodokhranilishch gidroelektrostantsii SSSR (Dynamics of the shores and basins of reservoirs of hydroelectric power plants of the USSR). Leningrad: Energija (Publ.). 244 p (in Russ).
- Homenko V.P. (2006) Zakonomernosti i prognoz suffozionnykh protsessov (Patterns and forecast of subsurface processes). M.: GEOS (Publ.). 2006. 216 p (in Russ).
- Kazakov K. Ya. (1981) Subsurface phenomena in the Russian Plain and adjacent territories. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo o-va*. Vol. 113. Iss. 1. P. 40–48 (in Russ).
- Lomtatze V.D. (1977) Inzhenernaya geologiya. Inzhenernaya geodinamika (Engineering geology. Engineering geodynamics). Leningrad: Nedra (Publ.). 479 p (in Russ).
- Mashkov A.F. (2006) The influence of the subsurface process on the stability of the right slope of the Kama River valley. *Problemy flyuvial'noi geomorfologii*. Izhevsk: Nauchnaya kniga (Publ.). P. 95–97 (in Russ).
- Nazarov N.N. (2008) Geodinamika poberezhii vodokhranilishch Permskogo kraia (Geodynamics of reservoir coasts in Perm Krai). Perm': Poligrafkomplekt (Publ.). 152 p (in Russ).
- Ollier K. (1987) Vyvetrivanie (Weathering). Moscow: Nedra (Publ.). 348 p (in Russ).
- Pastushkova S.A. (1987) Opyt izucheniya rel'efa lessovykh territorii po kartograficheskim i aerokosmicheskim materialam (Experience in studying the relief of loess territories using cartographic and aerospace materials). *Geomorfologiya*. No. 4. P. 36–41 (in Russ).
- Pecherkin I.A. (1969) Geodinamika poberezhii Kamskih vodokhranilishch (Geodynamics of the coasts of the Kama reservoirs). Perm': Permskii un-t (Publ.). 308 p (in Russ).
- Pecherkin I.A., Pecherkin A.I., Kachenov V.I. (1980) Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya ekzogennykh geologicheskikh protsessov na beregakh vodokhranilishch (Theoretical foundations of forecasting exogenous geological processes on the shores of reservoirs). Perm': Permskii un-t (Publ.). 86 p (in Russ).
- Polunin G.V. (1983) Ekzogennyye geodinamicheskie protsessy gumidnoi zony umerennogo klimata (Exogenous geodynamic processes of the humid zone of temperate climate). Moscow: Nauka (Publ.). 272 p (in Russ).
- Polunin G.V. (1989) Dinamika i prognoz ekzogennykh protsessov (Dynamics and forecast of exogenous processes). Moscow: Nauka (Publ.). 232 p (in Russ).
- Ryzhov Yu.V. (2015) Formirovanie ovragov na yuge Vostochnoi Sibiri (The formation of ravines in the south of Eastern Siberia). Novosibirsk: Geo (Publ.). 180 p (in Russ).
- Saljukova R.I. (1977) Development of ravines and their slopes in the South Minusinsk basin. *Voprosy dinamicheskoi geomorfologii*. Irkutsk: Sib. Otd-nie AN SSSR, In-t geografii Sibiri i Dalnego Vostoka (Publ.). P. 55–81 (in Russ).
- Shhukin I.S. (1960) Obshchaya geomorfologiya. Tom 1. (General Geomorphology. Vol. 1) Moscow: MGU (Publ.). 615 p (in Russ).
- Shhukin I.S. (1964) Obshchaya geomorfologiya. Tom 2. (General Geomorphology. Vol. 2). Moscow: MGU (Publ.). 564 p (in Russ).
- Stupishin A.V. (1967) Ravninnyi karst i zakonomernosti ego razvitiya na primere Srednego Povolzh'ya (Lowland karst and patterns of its development on the example of the Middle Volga region). Kazan': Kazanskii un-t (Publ.). 291 p (in Russ).