

**С.В. РЫБАЛЬЧЕНКО\*, К.В. ВЕРХОВОВ\*\***

\*Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований,  
693000, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25, Россия, rybalchenko\_sv@mail.ru

\*\*ОАОУ СТК «Горный воздух»,  
Южно-Сахалинск, ул. Горный воздух, литер В, Россия, konstantin\_verhovov@mail.ru

### **ЭВОЛЮЦИЯ СЕЛЕВЫХ БАСЕЙНОВ НА СКЛОНАХ МОРСКИХ ТЕРРАС ПОБЕРЕЖЬЯ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ И ОСТРОВА САХАЛИН**

*Формирование селей и возникновение селевых бассейнов на морских террасах, а также их дальнейшее развитие до сих пор является малоизученной областью селеведения. Для создания инженерной защиты, территориального планирования и трассировки линейных сооружений с учетом особенностей динамики развития селевых бассейнов на морском побережье требуется комплексный подход к изучению и прогнозированию эволюции подобных форм рельефа. На основе полевых материалов и архивных данных были определены формы рельефа на склонах морских террас побережья Магаданской области и о. Сахалин, являющиеся селевыми бассейнами; обработан большой массив инженерно-геологических и метеорологических данных, морфометрических и морфологических характеристик селевых бассейнов. На основе особенностей геоморфологического строения селевого русла было выделено четыре стадии эволюции селевых бассейнов на морских террасах, а также определен ряд признаков, качественных характеристик селевых бассейнов, позволяющих точно идентифицировать ту или иную стадию их эволюции. Также рассмотрены условия возникновения и развития селевых бассейнов, установлены основные факторы, определяющие стадийный переход селевых бассейнов на склонах морских террас. Знание закономерностей возникновения и развития селевых бассейнов позволит принять комплекс мер по инженерной защите территорий и снижению негативного воздействия на различных стадиях развития селевых бассейнов.*

Ключевые слова: *склоновый селевой бассейн, долинный селевой бассейн, селеопасный период, селевой режим, экзогенные процессы, эрозионный врез, селевые отложения, селевое русло.*

**S.V. RYBAL'CHENKO\*, K.V. VERKHOVOV\*\***

\*Special Research Bureau for Automation of Marine Research, Far Eastern Branch,  
Russian Academy of Sciences, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, ul. Gor'kogo, 25, Russia, rybalchenko\_sv@mail.ru

\*\*RAI STC Gornyi Vozdukh,  
Yuzhno-Sakhalinsk, ul. Gornyi vozdukh, liter V, Russia, konstantin\_verhovov@mail.ru

### **EVOLUTION OF DEBRIS FLOW BASINS ON THE SLOPES OF MARINE TERRACES OF THE COAST OF MAGADAN OBLAST AND SAKHALIN ISLAND**

*Formation of debris flows and occurrence of debris flow basins on marine terraces, and also their further evolution is still a poorly explored area of debris flow research. To create the engineering protection, spatial planning and laying-out of line structures with due regard for the dynamics of development of debris flow basins on the sea coast requires an integrated approach to the study and prediction of the evolution of such landforms. Field material and archival data were used as a basis to determine landforms on the slopes of marine terraces of the coast of Magadan oblast and Sakhalin Island which are debris flow basins. We processed a large array of engineering-geological and meteorological data, and morphometric and morphological characteristics of the debris flow basins. On the basis of the characteristics of the geomorphological structure of the debris flow channel, we identified four evolutionary stages of the debris flow basins on the marine terraces as well as determining a number of attributes and quality characteristics of the debris flow basins, allowing us to accurately identify a particular stage of their evolution. Furthermore, we examined the conditions for emergence and evolution of debris flow basins and determined the main factors that are responsible for the transition of the debris flow basins on the slopes of the marine terraces from stage to stage. Knowledge of the occurrence and evolution patterns of debris flow basins is instrumental in undertaking a package of measures for the engineering protection of territories and for a minimization of the negative impact at different evolutionary various stages of debris flow basins.*

Keywords: *slope debris flow basin, valley debris flow basin, debris flow hazard period, regime of debris flow, exogenous processes, erosional incision, debris flow deposits, debris flow channel.*

## ВВЕДЕНИЕ

Селевые процессы широко распространены на территории Магаданской области и о. Сахалин: земли 20 населенных пунктов, около 180 км железных и более 260 км автомобильных дорог подвержены воздействию селей, сходящих со склонов морских террас [1].

Объемы селей в среднем не превышают 20 тыс. м<sup>3</sup>, однако эти потоки причиняют значительный ущерб, повреждая и разрушая автомобильные и железные дороги, опоры и пролетные строения мостов, хозяйственные постройки, городские коммуникации, линии связи и электропередач. Сели заваливают полотно дорог, прерывая движение поездов и транспортных средств, забивают отверстия мостов и труб, выводя их из строя [2]. Кроме непосредственного воздействия селевых потоков, значительный ущерб на урбанизированных территориях наносят активно растущие селевые бассейны — крупные эрозионные формы рельефа (овраги, балки, врезы), которые увеличивают общую расчлененность рельефа вплоть до состояния бедленда и тем самым негативно влияют на территориальное планирование [3].

Стоит отметить, что вопрос возникновения и развития селевых бассейнов на склонах морских террас до сих пор малоизучен и представляет как научный (на основе данных устанавливаются генезис и история развития рельефа), так и практический интерес, поскольку активное формирование селевых бассейнов с частыми селями может внести существенные изменения в территориальное планирование в течение ближайших 20–30 лет.

Для снижения негативного воздействия селевых процессов на урбанизированных территориях необходимо изучить процесс формирования и развития селевых бассейнов на склонах морских террас.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МОРСКИХ ТЕРРАС И СЕЛЕВОЙ РЕЖИМ ПОБЕРЕЖЬЯ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ И О. САХАЛИН

Возникновение селевых бассейнов на морских террасах изучаемой территории обусловлено особенностями их геологического строения.

Грунты, слагающие морские террасы о. Сахалин, представлены преимущественно песчаниками, алевролитами, аргиллитами [4, 5]. Породы характеризуются низкими фильтрационными свойствами, хорошей размокаемостью (неразмывающие скорости 2,1–5,5 м/с) и набухаемостью, низким сцеплением и углом внутреннего трения, что способствует активному их вовлечению в селевые процессы [6].

На побережье Магаданской области селеформирующие породы представлены пылеватými песками, глинами, суглинками с прослоями лигнитов неогенового периода<sup>1</sup>. Такие грунты из-за наличия большой составляющей пылеватых тонкодисперсных частиц (до 70 %) и относительно большой пористости (до 47 %) при изменении гидрологической обстановки и влажностного режима существенно снижают свою несущую способность, испытывая пластичные деформации, а при сильном обводнении способны формировать на склонах связанные грязевые селевые потоки (неразмывающие скорости 0,3–2 м/с) [7].

Активизация селевых процессов на склонах морских террас происходит под воздействием гидрометеорологических факторов: муссонного климата с мощными циклонами и интенсивными осадками, обильного весеннего снеготаяния (в том числе отложений снега в отрицательных формах рельефа).

Наиболее важны среди гидрометеорологических факторов режим, интенсивность, продолжительность осадков и режим температур, определяющие как условия вовлечения в селевой процесс горных пород, так и скорость выветривания последних, от чего зависит скорость формирования потенциальных селевых массивов накопления [8]. Различными сочетаниями этих показателей обуславливаются сроки селеопасного периода, повторяемость селей и селевая активность.

Селеопасный период длится с апреля по ноябрь. Формирование селевых потоков на морских террасах побережья Магаданской области и о. Сахалин имеет два пика: конец мая—начало июня и август—сентябрь.

Активизация селевых процессов весной связана с переувлажнением грунтов вследствие снеготаяния. Грунты, переходя в текучее состояние, трансформируются в селевой поток. Как правило, в этот период образуются склоновые сели — вязкие грязевые и грязекаменные потоки повышенной плот-

<sup>1</sup> Сводный отчет по сейсмическому микрорайонированию территории города Магадан. — Магадан: Северо-восточный трест инженерно-строительных изысканий, 1977. — 201 с.

ности (1900–1950 кг/м<sup>3</sup>). Длина пути таких селей меньше, чем селей, сформировавшихся во время сильных дождей и имеющих меньшую вязкость (плотность 1300–1600 кг/м<sup>3</sup>) [9, 10].

Селевой режим морских террас о. Сахалин отличается цикличностью, обусловленной необходимостью предварительной подготовки материала селевого бассейна (накопления продуктов выветривания в селевых очагах). Возникновение и развитие селевого бассейна происходит по мере формирования потенциальных селевых массивов и дальнейшего прохождения селя.

Особенность селевого режима о. Сахалин заключается в том, что условия селеобразования в первую очередь определяются геологическими (характером пород, слагающих потенциальные селевые массивы) и геоморфологическими (морфометрическими характеристиками селевых очагов и селевых бассейнов) факторами селеобразования; гидрометеорологические факторы играют подчиненную роль [11]. Прямой зависимости между выпадением обильных осадков и формированием селевых потоков на Сахалине не отмечается [9].

Периоды возникновения селей на побережье Магаданской области (по данным наблюдений и дендрохронологии) соответствуют времени прохождения наиболее мощных летних циклонов [12]. Циклоническая деятельность здесь играет не только роль триггерного механизма селеобразования, но и выступает определяющим фактором возникновения селей и формирования селевых бассейнов на склонах морских террас. Селевой режим территории отличается отсутствием выраженной периодичности и цикличности. Формирование и развитие селевого бассейна под действием циклона происходит не линейно, а поэтапно: очередное метеорологическое событие (циклон) позволяет перейти селевому бассейну на новую стадию эволюции.

### ЭВОЛЮЦИЯ СЕЛЕВЫХ БАССЕЙНОВ НА СКЛОНАХ МОРСКИХ ТЕРРАС

Этапы эволюции селевых бассейнов определяли по геоморфологическим характеристикам их русел, меняющихся с течением времени под действием экзогенных процессов. Условно можно выделить четыре стадии развития селевых бассейнов на склонах морских террас побережья Магаданской области и о. Сахалин, каждой из которых соответствуют своя форма и стадия развития русла.

Стадия эволюции I — склоновые селевые бассейны с отсутствием русла, определяющего траекторию движения селевого потока.

Склоновые селевые бассейны представлены мелкими эрозионными и денудационными формами рельефа (эрозионными врезами, рывтинами, промоинами и оползневыми цирками), расположенными на склоне морской террасы. На стадии I продольный профиль селевого бассейна лишь незначительно отличается от профиля склона, а водосбор может иметь значительные размеры, поскольку относится к водосбору всего склона или его части. Представляя собой начальный этап эволюции, селевые бассейны отличаются отсутствием четкого русла и малой длиной зоны транзита, угол продольного уклона которой значительно превышает угол внутреннего трения грунтов, слагающих потенциальный селевой массив [13]. Этим обусловлено значительное влияние на селеформирование касательных напряжений в потенциально селевом массиве, возникающих от собственного веса грунта, что способствует развитию сдвиговых и эрозионно-сдвиговых селевых процессов [14–16].

Преобладают грязекаменные и грязевые связные сели. Генезис водной составляющей склоновых селей как дождевой, так и снеготаяния.

Максимальные объемы склоновых селевых потоков (грязевых и грязекаменных) до 500 м<sup>3</sup>. Длина пути таких потоков, как правило, десятки — первые сотни метров. Плотность отложений достаточно велика (1900–2300 кг/м<sup>3</sup>). Селевые отложения расположены у подножья и на поверхности склона, имеют небольшие объемы и конусообразную форму, часто перекрываются коллювиальными отложениями. Растительность (в том числе пионерная в виде мхов и лишайников) отсутствует. В связи с активным протеканием склоновых геодинамических процессов почвенный слой не успевает образовываться.

Склоновый селевой бассейн может сформироваться как в существующей мелкой эрозионной форме рельефа (врезе, рывтине, промоине), так и первичным склоновым селем, если потенциальный селевой массив находится в состоянии предельного равновесия (потенциальный селевой очаг). В пределах одного бассейна может располагаться сразу несколько мелких эрозионных форм рельефа, однако они не являются руслом, поскольку не обуславливают движение селевого потока по определенной траектории.

Процесс возникновения и развития элементарных склоновых селевых бассейнов нередко принимает бурный характер: первая стадия протекает в течение 2–5 лет.

Стадия эволюции II — склоновые селевые бассейны с четко выраженным руслом.

Селевые бассейны этой стадии представлены крупными эрозионными врезами, денудационными воронками и небольшими оврагами, расположенными на склоне. Такие бассейны имеют угол продольного уклона зоны транзита, равный или превышающий угол внутреннего трения грунтов, слагающих потенциальный селевой массив и четко выраженное русло. В данных бассейнах развиваются сдвиговый и эрозионно-сдвиговый селевые процессы.

Селевые бассейны этой стадии имеют выработанный продольный профиль, отличный от профиля склона, и собственный водосбор. В руслах бассейнов могут присутствовать временные водотоки.

На стадии II эволюции в селевом бассейне четко выделяются три морфодинамические зоны: зарождения, транзита, аккумуляции [17, 18].

Зона зарождения может иметь значительную протяженность относительно селевого бассейна, что наиболее характерно для низких склонов с большими уклонами. В таком случае селевой очаг, представленный денудационной формой рельефа, непосредственно переходит в аккумулятивную форму с минимальной длиной зоны транзита [19].

Максимальные объемы селевых потоков могут достигать 5000 м<sup>3</sup>. Длина пути составляет несколько десятков или сотен метров. Селевые отложения аккумулируются у подножья склона, зачастую веерообразной формы, плотность их составляет 1800–2300 кг/м<sup>3</sup>. Растительность в селевом бассейне имеет очаговый характер и представлена мхом, лишайником, разнотравьем, порослью кустарника и деревьев. При активном селеформировании растительность и почвенный покров отсутствуют. В данных селевых бассейнах наблюдаются следы именно активного селеформирования (заплески селей разных высот, повреждения на деревьях с различными датировками, наличие нескольких пачек селевых отложений разного возраста, перекрывающих друг друга).

Селевые потоки на данной стадии могут формироваться с периодичностью раз в 3–4 года.

Стадия эволюции III — долинные бассейны, с невыработанным продольным профилем русла, замыкающий створ которых достиг местного базиса эрозии.

Селевые бассейны этой стадии характеризуются небольшими ущельями, каньонами и балками, в бортах которых формируются вторичные склоновые селевые бассейны. В долинных селевых бассейнах на фоне превышения угла внутреннего трения аллювиально-пролювиальных отложений над углом продольного уклона русла преобладает эрозионно-транспортный селевой процесс [20]. Зона транзита долинных селевых бассейнов имеет значительную протяженность относительно селевого бассейна и выраженное меандрирование. В данных бассейнах формируются грязевые, грязекаменные и наносоводные селевые потоки, преимущественно дождевого генезиса. Максимальные объемы селей могут достигать 20 000 м<sup>3</sup>. Длина пути составляет несколько сотен метров — первые километры.

Селевые бассейны могут иметь сильную залесенность и хорошо задернованный конус выноса с порослью кустарников и деревьев, однако при активном селепроходе растительность может носить очаговый характер. Русла таких бассейнов, как правило, имеют постоянный водоток и аллювиальные отложения, а в бортах могут формироваться вторичные склоновые селевые бассейны. В днищах долин наблюдается скопление большого объема рыхлообломочного материала.

В целом такие развитые формы рельефа более устойчивы к склоновым экзогенным геологическим процессам, и частота селеформирования в них может снижаться. В процессе развития и активного роста такие бассейны способны перехватывать другие водосборы соседствующих форм рельефа.

Возникновение бассейнов этой стадии возможно двумя путями: при эволюции селевого бассейна низшей стадии под действием экзогенных процессов, а также непосредственное формирование селевого бассейна стадии III при проявлении эндогенных процессов (образование тектонического разлома).

Стадия эволюции IV — долинные бассейны, выраженные разветвленной сетью селевых бассейнов разных стадий, объединенных общим руслом.

Селевые бассейны стадии IV представлены протяженными V-образными и U-образными долинами с пологим профилем и разветвленной сетью водотоков разных порядков. В бортах активно формируются вторичные склоновые и долинные селевые бассейны [19]. Максимальные объемы селевых потоков могут достигать нескольких десятков тысяч кубических метров. Длина пути составляет несколько километров. Селевые потоки имеют плотность 1100–1800 кг/м<sup>3</sup>. Конус выноса сложен аллювиально-пролювиальными отложениями. В русле бассейна присутствуют пролювиальные отложения в виде полей аккумуляции, селевых гряд или террас. Из-за наличия вторичных селевых бассейнов увеличивается частота селеформирования, возможен массовый сход селей в пределах одного бассейна.

Основные факторы, определяющие переход селевых бассейнов на склонах морских террас Магаданской области и о. Сахалин от стадии к стадии, — геологические и геоморфологические; гидрометеорологические условия играют второстепенную роль [9].

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

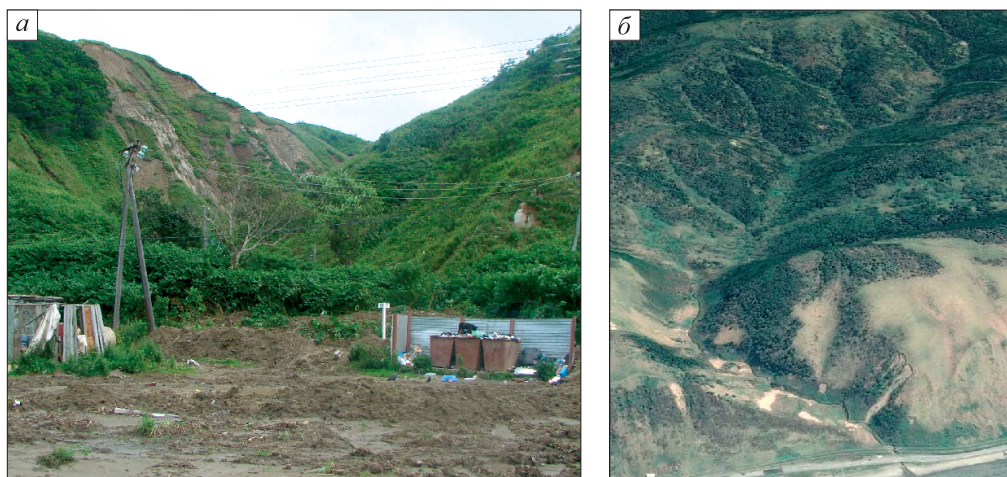
Для снижения негативного воздействия селевых процессов на урбанизированные территории побережья Магаданской области и о. Сахалин необходимо учитывать закономерности возникновения и развития селевых бассейнов. Селеформирующие породы морских террас Магаданской области и о. Сахалин представлены четвертичными отложениями, которые легко вовлекаются в склоновые геодинамические процессы, что способствует активному возникновению и развитию селевых бассейнов.

Стадии I и II эволюции селевых бассейнов — склоновые (рис. 1): угол продольного уклона зоны транзита равен или превышает угол внутреннего трения пород потенциального селевого массива ( $\alpha \geq \varphi$ ). Это обуславливает значительное влияние на селеформирование касательных напряжений в потенциально селевом массиве, возникающих от собственного веса грунта, что способствует развитию



*Рис. 1.* I и II стадии развития селевых бассейнов.

Склоновый селевой бассейн: *a* — с отсутствием русла, *б* — с четко выраженным руслом.



*Рис. 2.* III и IV стадии развития селевых бассейнов.

Долинные бассейны: *a* — с вторичными склоновыми бассейнами, *б* — с разветвленной сетью селевых бассейнов.



сдвиговых и эрозионно-сдвиговых селевых процессов. Формируются преимущественно под действием экзогенных факторов.

Стадии III и IV эволюции селевых бассейнов — долинные (рис. 2): угол продольного уклона зоны транзита меньше угла внутреннего трения пород потенциального селевого массива ( $\alpha < \varphi$ ), что способствует развитию эрозионно-транспортного селевого процесса. Формируются под влиянием экзогенных процессов путем эволюции бассейнов низших стадий или возникают непосредственно под воздействием эндогенных процессов.

Таким образом, на основе особенностей геоморфологического строения селевого русла выделено четыре стадии эволюции селевых бассейнов, каждой из которых соответствуют своя форма и стадия развития русла, а также выделены морфометрические признаки селевых бассейнов на разных стадиях эволюции. Знание закономерностей возникновения и развития селевых бассейнов позволяет прогнозировать скорость деградации земель вследствие активно растущих селевых бассейнов, а также разрабатывать мероприятия по инженерной защите, что позволит снизить селевые риски при трассировке линейных сооружений и территориальном планировании на урбанизированных территориях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбальченко С.В. Селевая опасность территорий населенных пунктов Сахалинской области и необходимость применения схем планировочных ограничений к генпланам населенных пунктов // Геориск. — 2013. — № 3. — С. 33–42.
2. Рыбальченко С.В. Склоновые селевые потоки Южного Сахалина // Материалы молодеж. науч. симп. «Современные научные исследования на Дальнем Востоке». — Южно-Сахалинск: Изд-во Ин-та развития образования Сахалинской области, 2012. — С. 52–59.
3. География овражной эрозии / Под ред. Е.Ф. Зориной. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. — 324 с.
4. Инженерная геология СССР. Т. 4: Дальний Восток / Под ред. Е.Г. Чаповского. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. — 502 с.
5. Геология СССР. Т. 33: Остров Сахалин / Под ред. В.Н. Верещагина — М.: Недра, 1970. — 403 с.
6. Полунин Г.В. Динамика и прогноз экзогенных процессов. — М.: Наука, 1989. — 232 с.
7. Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Этапы формирования селевых бассейнов на склонах морских террас Нагаевской бухты полуострова Старицкого (г. Магадан) // Вестн. ДВО РАН. — 2016. — № 5. — С. 94–99.
8. Генсоровский Ю.В., Казаков Н.А., Рыбальченко С.В. Гидрометеорологические условия периодов массового селеобразования на о. Сахалине // Труды Междунар. конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». — Пятигорск: Севкавгипроводхоз, 2008. — С. 95–98.
9. Казаков Н.А. Геологические и ландшафтные критерии оценки лавинной и селевой опасности при строительстве линейных сооружений (на примере о. Сахалин): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — М., 2000. — 17 с.
10. Казаков Н.А., Минервин И.Г. Селевые процессы на о. Сахалин // Прикладная геоэкология, чрезвычайные ситуации, земельный кадастр и мониторинг. — 2000. — Вып. 4. — С. 35–38.
11. Казаков Н.А. Сейсмогенные факторы селевого процесса в низкогорье (на примере о. Сахалин) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — М.: МАИК, 2007. — № 1. — С. 75–81.
12. Швер Ц.А. Климат Магадана. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 197 с.
13. Рыбальченко С.В., Верховов К.В. Понятие «склоновый сель» и классификация склоновых селевых бассейнов // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: Сб. материалов VI Сахалин. молодеж. науч. шк. — Южно-Сахалинск: Изд-во Ин-та морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2016. — С. 300–304.
14. Виноградов Ю.Б. Эрозионно-сдвиговой селевой процесс // Селевые потоки. — М.: Гидрометеиздат, 1976. — Сб. 1. — С. 114–122.
15. Виноградов Ю.Б. Сдвиговой селевой процесс и возникновение очагов // Селевые потоки. — М.: Гидрометеиздат, 1977. — Сб. 2. — С. 27–39.
16. Чоу С.Т., Чанг Й.Я. Экспериментальное исследование селей оползневого происхождения и процесса мобилизации материала // Тр. Междунар. конф. «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита». — Пятигорск: Севкавгипроводхоз, 2008. — С. 253–256.
17. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. — М.: Недра, 1980. — 296 с.
18. Флейшман С.М. Сели. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 140 с.
19. Перов В.Ф. Селеведение: Учеб. пособие. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. — 271 с.
20. Руководство по изучению селевых потоков / Под ред. Ю.Б. Виноградова. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 144 с.

*Поступила в редакцию 16.01.2017*

*После доработки 08.02.2017*

*Принята к публикации 02.04.2019*