

Использование данных дистанционного зондирования Земли при среднемасштабном геоинформационном картографировании селевой опасности Байкальской горной страны

В.П. Ступин, Л.А. Пластинин, Б.Н. Олзоев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Poccuя, stupinigu@mail.ru, plast@istu.edu, icob_irk@mail.ru

Аннотация. Анализируются источники и возможности находящихся в свободном доступе материалов дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа и программ по их обработке при геоинформационном картографировании селевой опасности Байкальской горной страны. Рассматриваются дешифровочные признаки селевых потоков, их морфологические, морфометрические и возрастные региональные закономерности и особенности. Показывается приуроченность селей к крутым сбросовым макросклонам горных хребтов при их сочленении с межгорными котловинами. Отмечается приуроченность селей к бассейнам I-II порядков, а селевых паводков к бассейнам III порядка и выше. Оценивается степень пораженности селями различных частей региона. Приводится макеты авторских карт селевой опасности для наиболее селеопасных территорий.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геоинформационное картографирование, селевая опасность

Ссылка для цитирования: Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Использование данных дистанционного зондирования Земли при среднемасштабном геоинформационном картографировании селевой опасности Байкальской горной страны. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Том 1. – Отв. ред. С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева. – Душанбе: ООО «Промоушн», 2020, с. 541–552.

Use of remote sensing data for medium-scale geoinformation mapping of debris-flow hazard in the Baikal mountain country

V.P. Stupin, L.A. Plastinin, B.N. Olzoev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, stupinigu@mail.ru, plast@istu.edu, icob_irk@mail.ru

Abstract. The sources and possibilities of freely available remote sensing data, digital terrain models and programs for their processing in the geoinformation mapping of debrisflow hazard of the Baikal mountain country are analyzed. Decoding features of debrisflows, their morphological, morphometric and age-related regional patterns and features are considered. It is shown that debris-flows are confined to the steep macroscopes of mountain ranges at their junction with intermountain basins. It is noted that debris-flows are confined to basins of the third order, and debris floods to basins of the third order and higher. The degree of contamination of various parts of the region by debris-flaws are estimated. Layouts of author's maps of debris-flaw hazard for the most mudslide-prone territories are given.

Key words: remote sensing data, geoinformation mapping, debris-flow hazard

Cite this article: Stupin V.P., Plastinin L.A., Olzoev B.N. Use of remote sensing data for medium-scale geoinformation mapping of debris-flow hazard in the Baikal mountain country. In: Chernomorets S.S., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Dushanbe: "Promotion" LLC, 2020, p. 541–552.

Введение

Освоение и социально-экономическое развитие Сибири требует основательных, всесторонних и надежных географических знаний о природных процессах и явлениях этого обширного и труднодоступного физико-географического региона. Особенно это касается динамичных, опасных и непредсказуемых процессов, одним из которых являются селевые. В полной мере это относится к Байкальской горнотаежной стране и, особенно, к территориям ее нынешнего и перспективного освоения: Байкало-Амурской и транссибирской железнодорожным магистралям и полосам их инфраструктуры, федеральной автомобильной дороге «Сибирь», линиям электропередач, нефтепроводам и т.п., где игнорирование реалий селевой обстановки может привести к катастрофическим последствиям.

Одним из основных методов получения географических знаний является картографирование, которое, в свою очередь, трудноосуществимо без широкого привлечения материалов и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Интеграция картографических и дистанционных методов в среде ГИС положена в основу картографо-космического мониторинга природных процессов и явлений, который является обязательным на региональном уровне [Пластинин и др., 2016].

В полной мере вышесказанное относится к картографированию пространственного распределения селей с последующей оценкой их опасности и рисков [Ступин и др., 2017].

В то же время, реалиями сегодняшнего дня является постоянное сокращение финансирования научных разработок, что, вкупе с обширностью исследуемой территории и дороговизной коммерческих данных ДЗЗ высокого разрешения, а также программ по их обработке, создает существенные трудности при картографировании. Поэтому особую актуальность представляет изыскание некоммерческих материалов ДЗЗ, ЦМР и программного обеспечения, пригодных для картографирования селей.

Цель и задачи исследования

В связи с изложенным выше, целью исследования стало изучение возможностей использования космических снимков свободного доступа, бесплатных ЦМР и специализированного программного обеспечения с открытым кодом лпя картографирования селевой опасности Байкальской горной страны, с ИХ апробированием на районах социально-экономического освоения региона. Для достижения поставленной цели нужно было решить следующие задачи:

- определение состава селевых явлений, отображающихся на комических снимках;
- уточнение дешифровочных признаков селевых явления;
- выяснение приуроченности выявленных явлений к элементам ландшафта;
- определение степени пораженности территории современными (отобразившимися на снимках) селями, особенно представляющим угрозу для людей, техники и сооружений.

Исходные материалы и программное обеспечение

Справедливости ради, следует отметить, что наряду с изложенными выше проблемами и трудностями нынешнего этапа изучения и картографирования селевых процессов и явлений, в настоящее время мы имеем целый ряд новых информационных и технических возможностей, о которых совсем недавно можно было только мечтать. Это, прежде всего, наличие полного покрытия территории интереса разнотипными, разновременными и разномасштабными цифровыми материалами ДЗЗ, а также хорошего программного обеспечения по их обработке. При этом, значительная часть этих материалов распространятся бесплатно, а программные средства имеют свободные коды доступа. Разумеется, с известной степенью потери качества выходных продуктов. На различных этапах картографирования в разной степени используются следующие материалы ДЗЗ и программные комплексы (ПК):

1. Цифровые модели рельефа SRTM и ALOS. Источники: http://dwtkns.com/srtm и http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/. Эти данные можно обрабатывать или на коммерческом ПК ArcGIS или на бесплатном SAGAGIS в целях выделения водоразделов и оконтуривания селевых бассейнов, нанесения тальвегов селевых русел, а также для определения их морфометрических характеристик;

2. Сканерные снимки Landsat-7, Landsat-8, Resourcesat-1, 2 и Sentinel-2 и др. Источники бесплатных онлайн-ресурсов:

- EarthExplorer or USGS https://earthexplorer.usgs.gov/,
- EO Browser и Sentinel Playground https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser,
- Карта России: https://satmaps/info, https://satmaps.ru/,
- Спутниковая карта России. Яндекс карты https://yandex.ru/maps/.

Указанные снимки обрабатываются или на коммерческих ПК ENVI, ArcGIS или на бесплатном SAGAGIS с тем, чтобы выявить современные склоновые и долинные сели, выполнить их координатную привязку (используя файлы GeoTIFF), отработать каталоги дешифровочных признаков для разных спектральных каналов, а также для панхроматических и синтезированных изображений.

3. Промежуточные материалы, полученные в результате обработки данных ДЗЗ с применением ПК. Их используют для отработки метрического и семантического содержания среднемасштабных (1:200 000–1:500 000) карт селевой опасности в ПК «Панорама» или MapInfo на подложке в виде цифровой топографической карты.

Дешифрирование космических снимков

Дешифрирование селевых явлений по материалам ДЗЗ – основной метод при их картографировании, позволяющий выявлять, определять положение, оконтуривать и определять качественные и количественные характеристики селевого рельефа и отложений с учетом ландшафтной специфики исследуемой территории.

Возможности и детальность дешифрирования определяются масштабом и пространственным разрешением космических снимков на местности. По снимкам выявляют селеопасные районы (по следам прошедших ранее селей), изучают природные условия и геологическое строение этих районов, определяют источники и направления поступления в селевые очаги твердой и жидкой составляющих селей. По завершении дешифрирования выполнияется районирование и картографирование территории, рассчитывается степень пораженности селями и оцениваются возможные риски от их прохождения.

Фиксировать прохождение селевого потока и изучать его динамику с помощью методов ДЗЗ в режиме реального времени практически невозможно, поэтому необходимо использовать материалы повторных съемок.

При выявлении и районировании селеопасных районов по космическим снимкам главным источником информации о них являются следы прошедших ранее селей. Проще всего дешифрируются селевые накопления, заполняющие расширенные участки речных долин или образующие конусы выноса у подножия гор при выходе на предгорные равнины или межгорные котловины. Свежие селевые накопления, лишены растительности и отображаются на снимках почти белым светлым или даже белым тоном, древние, покрытые почвенным и растительным покровом, более темным. Древние селевые отложения часто частично размыты или расчленены эрозией. Для территории исследования характерны водокаменные, глыбовые сели, которые дешифрируются по характерной зернистой текстуре, образованной освещенными с одной стороны глыбами и валунами (рис. 3b).

В процессе дешифрирования удобно пользоваться таблицей дешифровочных признаков селевых явлений. Дешифровочные признаки подразделяются на прямые (форма, тень, размер, тон, цвет, интегральная и спектральная яркость, текстура, структура, рисунок) и косвенные (ландшафтно-индикационные). Для каждой морфодинамической зоны (зарождения, транзита, аккумуляции) селя характерен свой специфический набор дешифровочных признаков.

Для зоны зарождения (очага) характерны следующие формы: узкие V-образные врезы на выпуклых перегибах склонов; водосборы с характерным сходящимся рисунком белых, почти белых или светло-серых полос склоновых селевых рытвин и борозд. Для изображений русла в месте зарождения селя характерна резкая смена серого тона на светло-серый и почти белый на темном окружающем фоне. В качестве дополнительных дешифровочных признаков служат сплывы и оползни на склонах, прилегающих сверху к молодому селевому врезу (рис. 1).



Рис. 1. Зона зарождения селя 2014 г. в районе пос. Аршан. Характерные признаки – V-образный врез с четкими бровками, светлый тон на темном фоне, оползни-сплывы по бортам вреза

Fig. 1. Zone of origin 2014 debris flaw in the area of the Arshan Settlement. Characteristic features – V-shaped incision with clear edges, light tone on a dark background, landslides and earthflows along the sides of the incision

Для зоны транзита прямыми дешифровочными признаками являются характерные формы селевого рельефа – широкие русла, часто занимающие все дно долины, с резкими и четкими бровками бортов; выпуклые селевые гряды и уплощенные полосы селевых отложений, фрагменты селевых террас, прислоненных к бортам селевого вреза; чередование суженых и расширенных (четкообразная форма) участков с промежуточными полями аккумуляции; выбросы обломочного материала за пределы селевого русла в местах его резких поворотов. Тон изображения – почти белый и светлосерый, русло серое. Рисунок линейно вытянутый, фестончатый в местах заплесков и обрушений подмытых берегов вдоль бровки селевого вреза. В селевой массе иногда заметны вывороченные стволы деревьев. Старые селевые русла дешифрируются по более светлому тону первичных кустарников, тополей, осин и берез среди темного лиственичника и кедрового стланика (рис. 2).

Зоне аккумуляции часто (но не всегда) присуща характерная формой молодого конуса в виде веера или узкого сектора с рукавами (гусиная лапка). Тон очень светлый и светлый для недавно прошедших селей и серый для более старых. Рисунок поверхности конуса выноса струйчатый, образованный переплетением пересохших русел и островов селевых отложений. Также характерны одиночные отдельные крупные глыбы или их цепочки. Для разновозрастных конусов выноса характерны серии наложенных друг на друга контуров, отличающихся по тону – чем светлее, тем моложе (рис. 3).

Возраст селей, дешифрируемых на космических снимках

О возрасте селевых явлений, выявляемых на космических снимках, можно судить по степени сохранности их прямых и косвенных дешифровочных признаков, зависящей, прежде всего, от скорости зарастания форм и отложений селевого генезиса растительностью. Таким образом, тип и динамика растительных сукцессий являются важным и надежным индикатором при определении времени схода селей, что, собственно, и положено в основу фитоиндикационных методов датировок: фитоценотических, дендрохронологических и лихенометрических, из которых при использовании данных ДЗЗ хорошо применим первый из перечисленных [Лехатинов, 2018].



Рис. 2. Зона транзита селя 2014 г. в районе пос. Аршан. Дешифрируется по резкому контрасту белого тона селевого русла на темном фоне таежной растительности. Характерна четкообразная форма русел и наличие «карманов» заплесков селевого материала

Fig. 2. The debris flow transit zone of 2014 in the area of the village. Arshan. It is decoded by the sharp contrast of the white tone of the mudflow channel against the dark background of taiga vegetation. The distinctive form of channels and the presence of "pockets" of splashes of mudflow material are characteristic



Рис. 3. Зона аккумуляции селя 2014 г. в районе пос. Аршан: а – конус выноса в форме «гусиной лапки», сложенный валунным материалом (верхняя часть) и шлейф песчано-дресвяных отложений (нижняя часть); b – зернистая структура и струйчатый рисунок поверхности валунных отложений конуса выноса

Fig. 3. The mudflow accumulation zone of 2014 in the area of the village Arshan: a - a cone in the form of a "goose foot", folded with boulder material (upper part) and a plume of sand and crushed stone deposits (lower part); b - granular structure and stream pattern of the surface of the boulder deposits of the removal cone

В горнотаежном поясе, представленном светлохвойной тайгой, «затушевывание» физиономических черт селевых явлений происходит за счет сукцессий фитоценозов порослевой, кустарниковой, жердевой и древесной первичной (осина) и вторичной (лиственница) растительности на их поверхности. Форма, тон, цвет и структура растительного покрова на снимках позволяют определить его сомкнутость, возрастной и породный состав и, тем самым, выявить положение, тип и возраст прошедших селевых потоков. Отсутствие растительности или наличие на конусах выноса кустарника, а также молодого (порослевого и жердевого) леса, указывает на сход селя не более 10-30 лет тому назад. В дальнейшем лиственница вступает в фазу быстрого роста (до 1 м/год) и формы селевого рельефа полностью зарастают.

В подгольцовом поясе основным видом растительности является кедровый стланик, который относится к медленнорастущим (около 0,15 м в год) растениям. Поэтому физиономичные черты селевого генезиса сохраняются на снимках в несколько раз дольше.

В гольцовом и нивальном поясах тон селевых отложений и форм рельефа определяет степень их выветривания, а также зарастания кедровым стлаником, мхом и лишайником. О скорости процесса зарастания можно судить на примере конуса выноса селя, сошедшего в 1969 году с правого борта долины р. Сыгыкта напротив устья р. Ледниковая (хребет Кодар). На аэрофотоснимке 1971 года селевые отложения прекрасно дешифрируется по своей характерной форме («гусиная лапка») и белому тону (рис. 4а). В 1978 году, когда один из авторов статьи выполнял теодолитную съемку этого конуса, он только начинал зарастать. На фрагменте снимка со спутника LandSat-8, полученного в 2019 году видно, что конус выноса полностью покрылся растительностью и слился с общим тоном подгорного пролювиального шлейфа (рис. 4b).



Рис. 4. Динамика зарастания конуса выноса селя 1969 г. (долина р. Сыгыкта, хребет Кодар): а — аэрофотоснимок 1971 г., b — космоснимок 2019 г.

Fig. 4. Dynamics of overgrowing of the 1969 debris flow cone (Sygykta river valley, Kodar Range): a - aerial photograph of 1971, b - space photograph of 2019. Designations: arrow – the cone of the debris flaw

Показательным примером зарастания селевых врезов, террас, гряд и конусов выноса является северный макросклон хребта Хамар-Дабан. После 1971 года, когда по многим речкам, впадающим в Байкал, произошел массовый сход селевых потоков, формы и отложения селевого генезиса настолько заросли пойменной древеснокустарниковой растительностью с преобладанием быстрорастущего (более 1 м/год) тополя душистого, что проявления этих селей практически невозможно обнаружить на современных снимках.

С другой стороны, внешний облик форм и отложений серии аршанских селей 2014 года (хр. Тункинские Гольцы) за прошедшие без малого пять лет практически не изменился, и они все так же уверено дешифрируются на космических снимках. Другой

пример хорошей сохранности – серия селей 2001 года в районе озер Большое и Малое Леприндо (хр. Кодар), которые только начали зарастать.

Таким образом, в исследуемом регионе, по материалам ДЗЗ по прямым дешифровочным признакам можно уверенно распознавать селевые явления 20–25летней давности. Выявление более ранних селей (в пределах 25–40 лет), а также выделение разновозрастных генераций одного и того же селевого бассейна (например, конуса выноса селевых отложений на реках. Анамакит и Анамакиткан (Верхнеангарский хребет), требует подключения ландшафтных признаков. Для идентификации еще более ранних селей (до 100–200 лет) необходимо привлекать полевые дендрохронологические и лихенометрические методы [Лехатинов, 1967].

Селевая опасность территории по данным дистанционного зондирования

Приведенный ниже обзор селевой опасности региона основан на срезе данных, полученных с помощью материалов дистанционного зондирования из космоса, то есть на селевых явлениях, произошедших за последние несколько десятков лет. Эти относится, например, к уже рассмотренной выше ситуации на территории заведомо селеопасного южного Прибайкалья [Лапердин и др., 2016], где, при высокой потенциальной угрозе схода селей с северного макросклона хребта Хамар-Дабан, на космических снимках не наблюдается следов современных селевых потоков. Тем не менее, даже короткий временной срез в 20–30 лет может быть полезен при оценке селевой опасности и рисков региона.

Становой участок Байкало-Амурской магистрали

Байкальский хребет. Участок Даван-Нижнеангарск. На этом участке проходит трасса железнодорожной магистрали и ее автодублера. Здесь расположен Байкальский тоннель длиной 6686 м, проложенный под перевалом Даван Байкальского хребта, а также четыре мысовых тоннеля с эстакадами и виадуками на побережье Байкала между Северобайкальском и Нижнеангарском длиной 414, 1843, 1706 и 1344 м. Современных проявлений селевой деятельности на снимках не отмечается. В районе перевала Даван видны следы схода лавин, а на прижимном участке Байкала встречаются осыпные склоны.

Верхнеангарская котловина. На перегоне Ангоя-Анамакит (1181–1227 км) трасса БАМ близко подходит к южному участку Верхне-Ангарского хребта, который в гольцовой зоне носит ярко выраженный альпийский характер. Высоты в пределах участка достигают 2629 м. Склоны водоразделов круты, у их подножий формируются обширные каменистые осыпи. Гребни хребта возвышаются над дном долин на 1200– 1300 м. Граница леса проходит на высоте 1000-1200 м, а кедровый стланик поднимается до 1800 м. Практически все распадки водотоков, стекающих с крутого юго-восточного тектонического склона хребта селеопасны. На космических снимках видны следы многочисленных свежих селей по руслам речек Огней, Подкаменный, Глыбовый, Анамакит, Нюмиянда, Анамакиткан и др. Конуса выноса некоторых из них доходят до железнодорожного полота и автодублера БАМа и представляют реальную угрозу путям и мостовым сооружениям, несмотря на имеющиеся на этих объектах селезащитные сооружения (рис. 5).

На рис. 6 представлена карта селевой опасности описанного выше макросклона. Сплошной заливкой представлены литодинамические пояса: денудационный, объединяющий альпийский, гольцовый и горнотаежный высотные уровни (1); сегмент аккумулятивных пологонаклонных подгорных шлейфов (2); сегмент аккумулятивных низких террас и плоских пойм (3). На карте также показаны: русло Нижней Ангары (4) и русла водотоков не несущих следы схода селевых потоков (5). Граница леса показана знаком (6). Стрелками выделены выявленные по снимкам свежие селевые русла с конусами выноса (7) и полузаросшие селевые русла более раннего возраста (8). Также на карте представлены водоразделы речных бассейнов (9) и трасса БАМ (10). Площади водосборов в кв. км показаны знаком (11).



Рис. 5. Селеносные водотоки юго-восточного склона Верхнеангарского хребта. Космоснимок со спутника Landsat-8, 2019 г.

Fig. 5. Debrisflaw risk watercourses of the southeastern slope of the Upper Angara Range. Satellite image from Landsat-8, 2019



Рис. 6. Карта селевой опасности участка Верхнеангарского хребта. Пораженность выявленными по космоснимкам селями составляет 55%. Обозначения: 1 — денудационный литодинамический пояс, объединяющий альпийский, гольцовый и горнотаежный высотные уровни; 2 — сегмент аккумулятивных пологонаклонных подгорных шлейфов; 3 — сегмент аккумулятивных низких террас и плоских пойм; 4 — русло р. Верхняя Ангара; 5 — русла водотоков, не несущих следы схода селевых потоков; 6 — граница леса; 7 — выявленные по снимкам свежие селевые русла с конусами выноса; 8 — полузаросшие селевые русла более раннего возраста; 9 — водоразделы; 10 — трасса БАМ; 11 — площади водосборов, км².

Fig. 6. Map of the debris flow hazard of the North Angara Range. The prevalence of debris flows revealed by the pictures is 55%. Designations: 1 - denudation lithodynamic belt, combining alpine, alpine and mountain taiga altitude levels; 2 - a segment of accumulative gently sloping piedmont loops; 3 - segment of accumulative low terraces and flat floodplains; 4 - river bed Upper Angara; 5 - channels of watercourses that do not carry traces of debris flows; 6 - forest border; 7 - fresh debris flow channels with drift cones identified from the pictures; 8 - semi-overgrown debris flow channels of an earlier age; 9 - watersheds; 10 - BAM route, 11 -catchment areas in km²

Северо-Муйская котловина. В западной части котловины, от Северомуйска на восток отмечается серия селевых выбросов как с южного склона Северомуйского хребта, так и с северного склона Муяканского, причем большая часть последних достигает трассы БАМ и ее автодублера и проходит под мостами. В средней части котловины железнодорожная трасса и параллельная ей автодорога проходят достаточно далеко от селеопасных макросклонов, но на правом берегу Витима приближается к северному склону Южно-Муйского хребта со следами свежей селевой деятельности (рис. 7). Так, в 3,5 км от Витима, дешифрируется свежее русло и конус выноса небольшого селевого потока, проходящего под железнодорожным и автомобильным мостами. В узкой долине Сюльбана на снимках заметны свежие селевые конуса выноса в устье р. Саку (правый борт долины Сюльбана) и в устье безымянного ручья напротив устья р. Балбухта (левый борт).



Рис. 7. Сели на северном склоне Муяканского хребта. Космоснимок со спутника Landsat-8, 2019 г.

Fig. 7. Debris flaw of the northern slope of the Muyakan Range. Satellite image from Landsat-8, 2019

Чарская котловина. Потенциально селеопасные участки приурочены к короткому, но крутому южному макросклону хребта Кодар. На космических снимках со спутника GeoEye хорошо отобразились следы селевой деятельности в районе оз. Большое и Малое Леприндо. Здесь, с вплотную подходящего к БАМу крутого склона хребта Кодар 27 июля 2001 года произошел синхронный сход серии селевых потоков, состоящих из смеси воды и сорванного моренного материала, оставшегося от Сюльбанского ледника, и частично повредивших полотно железной дороги [Макаров, 2012] (рис. 8).



Рис. 8. Частично заросшие следы схода серии селевых потоков 2001 г. в районе озер Большое и Малое Леприндо. Космоснимок со спутника GeoEye-1, 2019 г.

Fig. 8. Partially overgrown traces of the deletion of a series of debris flows in 2001 in the area of the Lakes Bolshoye and Maloye Leprindo. Satellite image from GeoEye-1, 2019

При дальнейшем движении на восток трасса БАМ смещается на юг, переходит на правый берег р. Чара и удаляется от селеопасных склонов Кодара.

Баргузинская котловина. Наиболее селеопасен восточный макросклон Баргузинского хребта, где практически изо всех поперечных долин III-IV порядков регулярно «выстреливают» обычные и селевые паводки, следы которых хорошо видны на космических снимках.

Тункинская долина. В Тункинской долине свежие селевые формы выявляются на снимках, пожалуй, лучше, чем на остальной территории Байкальской горной страны, однако они не столь известны, так как расположены достаточно далеко от обжитых мест и крупных транспортных магистралей [*Ступин и др., 2018*]. Больше всего следов селей обнаруживается в районе массива Мунку-Сардык в районе слияния Белого и Черного Иркута и по крутому сбросовому южному макросклону альпинотипных Тункинских гольцов (рис. 10) в районе поселка Аршан.



Рис. 9. Русла селевых паводков на конусах выноса Баргузинского хребта у улуса Алла (Республика Бурятия). Космоснимок со спутника Landsat-8, 2019 г.

Fig. 9. The channels of debris flows on the cones of the removal of the Barguzinsky ridge near the village Alla. Satellite image from Landsat-8, 2019



Рис. 10. Пораженность селями южного склона хребта Тункинские Гольцы. Обозначения: 1 — водоразделы, 2 — русла постоянных водотоков, 3 — русла временных водотоков, 4 — русла со следами прохождения селей, 5 — селитебные территории, 6 — озера

Fig. 10. The impact of debris flow on the southern slope of the Tunkinsky Goltsy ridge. Designations: 1 -watersheds, 2 - channels of permanent watercourses, 3 - channels of temporary watercourses, 4 - channels with traces of debris flows, 5 - residential areas, 6 - lakes

Морфометрический анализ

Количественные морфометрические показатели выявленных селевых явлений определялись по ЦМР и космическим снимкам, которые позволяют получить длины, уклоны и высоты селевых русел как для селевого бассейна, в целом, так и для их денудационно-транзитных и аккумулятивных частей. Также можно определить площади водосборов как по земной поверхности, так и в проекции на горизонтальную плоскость. В таблице приведены данные по некоторым типичным селям региона.

Таблица. Морфометрические характеристики типичных селевых бассейнов и селевых русел Table. Morphometric characteristics of typical debris flow basins and channels

Положение	Площадь бассейна, км ² /	Общая длина, м	Денудационно- транзитная часть		Аккумулятивн. часть		Превышение, м
	порядок		длина	уклон	длина	уклон	
	водотока						
Тункинские	2.0 / I	3,38	2,46	48/33	0,92	29/13	1783-1012-904
гольцы, Аршан,							
р. Безымянный							
Тункинские	1.2 / I	4,56	3,20	44/23	1,36	16/9	1819-982-854
гольцы, Аршан,							
2-я Шихтолайка							
Тункинские	2.4 / I	6,30	4,30	41/25	2,00	22/10	1861-1000-813
гольцы, Аршан,							
р. Артемова							
СевМуйский	16,6 / II	12,51	9,27	30/8	3,24	16/6	1298-679-490
хр., лев. приток							
р. Подкаменный							
Северо-Муйский	27.3 /II	7,0	4,79	47/21	2,21	19/10	1743-706-488
хр, р. Глыбовый							
Кодар, озеро Б.	5.5 / II	3,53	2,49	61/31	1,04	19/8	1944-1080-978
Леприндо,							
восточный сель							
Кодар, приток р.	5.5 / II	3,0	2,4	57/31	0,6	32/18	1823-1162-
Сыгыкта против							1050
устья,							
р. Лелниковой						1	

Выводы

– Космические снимки открытого доступа отображают широкий диапазон селевых потоков, вплоть до мелких, выносящих 1-5 тыс. м³, и, совместно с ЦМР и топографическими картами, позволяют выявлять, дешифрировать и картографировать их морфологические особенности: селевые бассейны, зоны зарождения, транзита и аккумуляции.

 Прямые дешифровочные признаки позволяют выявлять селевые явления не старше нескольких десятков лет, следы селевой деятельности более раннего возраста можно выявлять на снимках только по косвенным (ландшафтным) признакам с привлечением материалов полевых исследований.

– Больше всего *свежих* долинных селепроявлений, несущих характерные черты водо- и грязекаменных потоков (селевые врезы, селевые гряды и конуса выноса), зафиксировано в руслах водотоков первого, реже второго порядков, сходящих с крутых сбросовых макросклонов Тункинских Гольцов, Баргузинского, Верхнеангарского, Северо-Муйского хребтов и хребта Кодар, расположенных в пределах бассейнов площадью до 50 км², имеющих длины до 10 км и средние уклоны порядка 30° для денудационной и 15° для аккумулятивных частей; эти долины наиболее опасны для железных и автомобильных дорог, ЛЭП, нефтепроводов и населенных пунктов, зачастую расположенных в зоне подгорных аккумулятивных пролювиальных шлейфов.

– Свежих селевых явлений на наиболее опасных участках южного макросклона хребта Хамар-Дабан по космическим снимкам не наблюдается из-за густой растительности, покрывшей следы последних залповых выбросов селей, сошедших еще в 1971 году; это означает, что селевое затишье в этом районе затянулось и вероятность активизации селевых процессов возрастает все больше и больше.

– Водотоки более крупных порядков (третьего, четвертого), такие как Кынгарга, Тыя, Анамакит и т.п., обычно несут следы селевых паводков в виде полос селевой аккумуляции вдоль расширенных пойм при отсутствии конусов выноса.

– Многочисленные *свежие* склоновые сели прекрасно выявляются по космическим снимкам в пределах элементарных бассейнов (площадью 1–2 км²) приводораздельных частей высоких альпинотипных хребтов на прямых и коротких склонах каров и трогов в гольцовой зоне; они представляют собой лишь потенциальную опасность, вследствие практической необжитости занимаемой территории (за исключением участков, примыкающим к пробитым в межгорных перемычках тоннелей – Байкальского, четырех Мысовых, Северо-Муйского, Кодарского), где они представляют определенную опасность наряду с парагенетическими лавинами, осыпями и оползнями.

Список литературы

- Лапердин В.К., Леви К.Г., Имаев В.С., Молочный В.Г. Опасные геологические процессы в югозападном Прибайкалье. – Иркутск, 2012. – 206 с.
- Лехатинов А.М. Дендрологический метод установления времени и периодичности прохождения селевых потоков. Вестник МГУ. Серия география. 1967, 2. с. 140-142.
- Лехатинов А.М. Природные индикаторы распространения и активности проявления селей // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Материалы V Международной конференции. Грузия, Тбилиси, 2018. с. 438-443.
- Макаров С.А. Сели Прибайкалья Иркутск, 2012. 111 с.
- Пластинин Л.А., Ступин В.П. Программы картографо-космического мониторинга природных и антропогенных процессов и явлений (на примере Байкальского региона) // Мат-лы Всеросс. науч.-практ. конф. «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов в области топогеодезического и навигационного обеспечения». СПб, 2016. с. 246-252.
- Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Новые принципы и приемы системного картографирования селевой опасности Южного Прибайкалья с использованием ГИС и ДЗЗ из космоса // От карты прошлого к карте будущего: сб. науч. тр. Пермь, 2017. Т. 2. с. 184-195.
- Ступин В.П., Пластинин Л.А., Олзоев Б.Н. Морфодинамическое картографирование селевой опасности гор Южного Прибайкалья. Геориск, 2018. № 4 с. 86-95.