Криосфера Земли, 2004, т. VIII, № 3, с. 57–67

УДК 511.311.21.(234.9)

МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА СЕЛЕВОГО БАССЕЙНА В УСЛОВИЯХ ГОРНОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

(*на примере долины реки Герхожан-Су, Кавказ***)**

Д. А. Петраков[1,2], О. В. Тутубалина[1,2], С. С. Черноморец[2], И. В. Крыленко[1]

[1] *Московский государственный ун-т им. М.В. Ломоносова, геогр. ф-т, 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, Россия*
[2] *Университетский центр инженерной геодинамики и мониторинга, 125252, Москва, ул. Куусинена, 25, Россия*

Предложена оригинальная методика изучения селевого бассейна, расположенного в горной криолитозоне. Комплекс традиционных исследований дополнен такими современными методами, как оперативное полевое картографирование при помощи приемников GPS, цифровые съемки и ГИС-технологии. Методика разработана и апробирована в ходе мониторинга селей в долине р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ) — одного из наиболее значимых селевых объектов Российской Федерации. Схема мониторинга учитывает стадии развития селевых очагов и индивидуальные особенности бассейна, прежде всего высокую динамичность отдельных его частей и широкое развитие погребенных льдов в зоне зарождения селевых потоков. Описаны проблемы и перспективы мониторинга, предложена схема интерактивной ГИС, позволяющей пользователю самостоятельно оценить степень селевой опасности на основании поступающей информации.

Селевая катастрофа, мониторинг, высокогорный селевой бассейн, погребенные льды, горная криолитозона, методика, геоинформационная система

METHODOLOGY FOR MONITORING OF A DEBRIS FLOW BASIN IN MOUNTAIN CRYOLITHOZONE

(*case study of the Gerkhozhan-Su River valley, Caucasus***)**

D. A. Petrakov[1,2], O. V. Tutubalina[1,2], S. S. Chernomorets[2], I. V. Krylenko[1]

[1] *Lomonosov, Moscow State University, Department of Geography, 119992, Moscow, GSP-2, Leninskiye Gory, Russia*
[2] *University Centre for Engineering Geodynamics and Monitoring, 125252, Moscow, Kuusinen str., 25, Russia*

We present a novel methodology for research of a debris flow basin situated in mountain cryolithozone. The traditional research techniques are enriched by mobile field mapping on the basis of GPS receivers, by digital photography and by geographic information system (GIS) technologies. The methodology has been developed and applied while monitoring debris flows in the Gerkhozhan-Su River valley (Central Caucasus), which is one of the most important debris flow valleys in the Russian Federation. The developed framework for monitoring takes into the account stages of development for debris flow origination sites and individual features of a debris flow basin, such as very dynamic development of terrain in certain parts of the basin and presence of buried stagnant ice at debris flow origination sites. We discuss problems and prospects of monitoring within the described framework and suggest a structure for an interactive GIS for the assessment of debris flow danger on the basis of regularly updated information.

Debris flow disaster, monitoring, alpine debris flow basin, buried stagnant ice, mountain cryolithozone, methodology, geographic information system

ВВЕДЕНИЕ

В условиях изменяющегося климата экзогенные процессы в зоне распространения многолетнемерзлых пород и современного оледенения отличаются высокой динамичностью. Потепление, наблюдающееся ныне на Центральном Кавказе, приводит к деградации ледников и вечной мерзлоты, что вызывает резкую активизацию селевых процессов. Возрастает опасность уничтожения и разрушения населенных пунктов, инженерных сооружений, увеличивается риск для населения горных районов.

Методика исследований селевых бассейнов была предметом изучения в годы, когда угроза селей в горных районах была значима в масштабах всей страны. По результатам работ были составлены ведомственные руководства, применявшиеся в системах Министерства геологии и Гидрометеорологической службы СССР [*Методическое руководство..., 1971; Руководство..., 1976; Методические указания..., 1989а,б; Руководство..., 1990*]. После распада СССР обновление методики изучения селевых объектов почти не проводилось.

Методические руководства обычно не учитывают, что очаги зарождения селей в ряде бассейнов расположены в криолитозоне. Между тем, особенности динамики погребенных льдов накладывают отпечаток на режим селей и строение селевых очагов.

© Д.А. Петраков, О.В. Тутубалина, С.С. Черноморец, И.В. Крыленко, 2004

Подойти к решению задачи локального прогноза катастрофических селей удастся, видимо, только если методы исследования будут учитывать стадию развития бассейна и время, прошедшее с момента последней катастрофы. Пока ни в одном из имеющихся методических руководств система методов не соотносится с периодами межкатастрофической динамики бассейна.

В последние годы появились новые методы исследований: оперативное полевое картографирование с помощью спутникового позиционирования (GPS), цифровые съемки, компьютерная обработка данных, технологии создания геоинформационных систем (ГИС). Опыт применения этих современных методов в селеведении пока невелик. Между тем, они дополняют традиционные методы и более полно раскрывают картину динамики селевого бассейна.

Для детальных исследований выбран наиболее значимый селевой объект Кабардино-Балкарии — высокогорный бассейн Герхожан-Су, сели из которого причиняют огромный ущерб жителям города Тырныауза. Ситуация, при которой селевые потоки большого объема сходят на город, уникальна для России.

Задачей данного исследования является разработка и апробация методики мониторинга хорошо изученного селевого бассейна, имеющего ряд особенностей. В нем зарождаются катастрофические сели, очаги которых находятся в горной криолитозоне, а конус выноса — в городе. Учитываются особенности развития селей в период между катастрофами и применяются современные технологии географических исследований.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Бассейн р. Герхожан-Су (рис. 1) — правого притока Баксана — занимает площадь около 75 км^2 [*Герасимов, 1967*]. Высшая точка бассейна — 4149 м, истока Каяарты-Су — около 3400 м, устье находится на высоте 1230 м. Собственно Герхожан-Су начинается после слияния двух ее составляющих — рек Каяарты-Су и Сакашили-Су. Все сели, достигавшие города в 2000 г., зарождались в верховьях Каяарты-Су. В верховьях долины Каяарты-Су преобладают альпинотипные формы рельефа. Источником жидкой составляющей селей служат воды этой реки, питание которой в летний период обеспечивается таянием ледников Западный и Восточный Каяарты, а также дождевыми осадками. Главным источником твердого материала для селей является комплекс исторических морен ледников Каяарты.

Характерной чертой бассейна является высокая распространенность в его верховьях объектов криосферы: ледников, погребенных льдов, каменных глетчеров, термокарстовых озер, криогенных оползней. Участие глетчерного льда, мертвых и погребенных льдов в селеформировании обусловливает специфические особенности механизмов зарождения и режима селей.

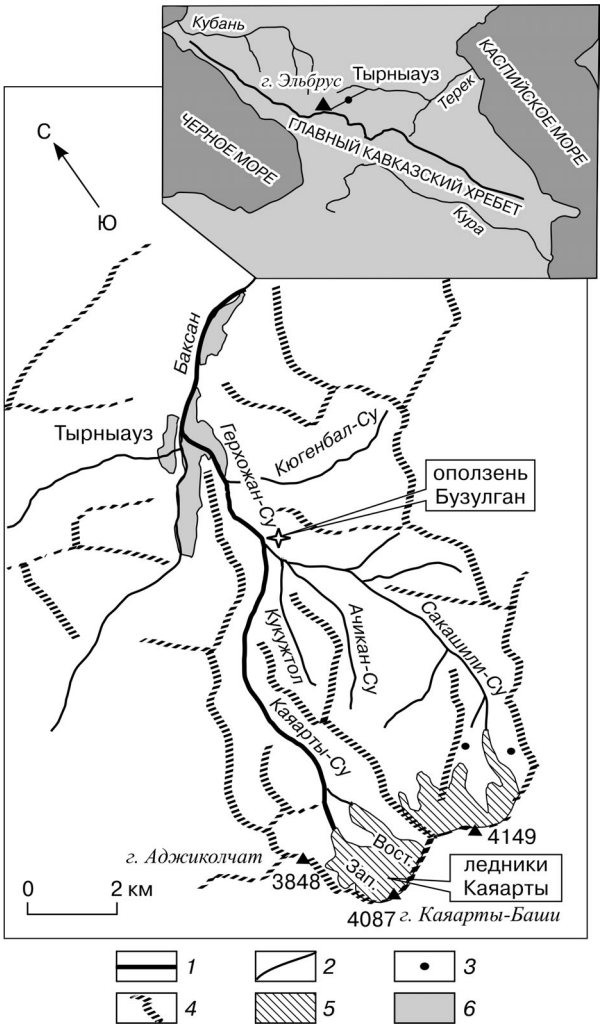

Рис. 1. Район исследований.

1 — путь движения селей 2000 г., *2* — реки, *3* — приледниковые озера, *4* — горные хребты, *5* — ледники, *6* — застройка г. Тырныауза.

Бассейн детально изучался в течение почти полувека. Нам удалось найти более 150 работ о нем, среди которых необходимо отметить наиболее подробные [*Тушинский и др., 1966; Герасимов, 1967, 1985; Рубцов, Сейнова, 1968; Сейнова, Рубцов, 1967; Флейшман и др., 1979; Золотарев и др., 1982; Докукин, 1985, 1987; Сейнова, 1997; Сейнова, Золотарев, 2001; Запорожченко, 2002*]. Обстоятельно исследованы инженерно-геологические характеристики бассейна. Гидрометеорологические, гляциологические и геокриологические факторы селеформирования изучены менее подробно.

По всей видимости, бассейн может быть выбран в качестве опорного объекта мониторинга

селевых процессов в России. С учетом специфики бассейна нами была разработана концепция его мониторинга.

Проектирование и создание системы исследований тесно связаны с выбором *точек* и *объектов мониторинга*. Точки могут располагаться как вне объектов (базисы фототеодолитной съемки, точки повторной фотосъемки), так и внутри объектов мониторинга (поперечные профили, площадки наблюдений за динамикой моренного массива). Объектами мониторинга являются ключевые участки, которые должны размещаться в частях бассейна, наиболее важных с точки зрения формирования селей. Необходимо отметить, что место расположения этих участков может изменяться с течением времени. Так, сели в верховьях р. Каяарты-Су в разные годы сходят от очагов как Западного, так и Восточного истоков. Катастрофические сели 1999 и 2000 гг. кардинально изменили строение днища долины, структуру литодинамических зон, и новое состояние бассейна потребовало дополнительного изучения.

ПРОВЕДЕННЫЕ РАБОТЫ

Изучение бассейна и подготовка его к мониторингу проводились нами в ходе полевых работ в период 24—30 июля и 20—27 сентября 2000 г., в июне—августе 2001, 2002 и 2003 гг. Основной целью работ было получение сведений об изменении морфометрических параметров прирусловой части долины Герхожан-Су и оценка условий селеформирования после селевой катастрофы 18—25 июля 2000 г.

Использование повторных съемок с закрепленных точек и измерений на поперечных профилях

Этот метод является традиционным способом фиксации изменений. Участки зарождения опасных процессов на Кавказе исследовались подобным образом уже в 60-х годах XIX в. в районе Казбека, на Девдоракском леднике [*Висковатов, 1864; Хатисян, 1864*]. Спустя почти полтора столетия эти методы продолжают оставаться одними из наиболее надежных и простых инструментов мониторинга.

Летом 2000 г. в ходе рекогносцировочного обследования долины Герхожан-Су был сделан ряд фотоснимков с точек, координаты которых определялись с помощью приемников GPS. В ходе последующих исследований количество точек съемки было увеличено, они были маркированы краской на валунах. Фотосъемка с этих точек повторялась. В течение сезонов 2000—2002 гг. было промаркировано 36 точек повторной фотосъемки, из них 26 являются самостоятельными точками, 4 совпадают с точками фототеодолитной съемки, 6 совмещены с точками цифровой стереосъемки. В течение четырех селеопасных сезонов с каждой точки сделано от 3 до 6 повторных снимков. Повторная фотосъемка с закрепленных точек позволяет оперативно оценить динамику наиболее интенсивно изменяющихся участков (рис. 2).

Осенью 2000 г. проведены первые после июльской катастрофы инструментальные измерения теодолитом в зоне зарождения и транзита селей. В период 22—27 сентября 2000 г. было заложено 15 поперечных профилей через селевой каньон и русловой врез, составлен продольный профиль долины р. Каяарты-Су. Осуществлена привязка поперечных профилей к долговременным опорным пунктам с маркировкой.

Проведена оценка объема катастрофического выноса твердого вещества из бассейна р. Герхожан-Су в целом и в пределах каждого характерного участка русла. В зависимости от бюджета селевой массы русло принято делить на следующие *литодинамические зоны*: преимущественно денудационную, транзитно-денудационную, преимущественно транзитную, транзитно-аккумулятивную и преимущественно аккумулятивную. Последовательность литодинамических зон может служить самостоятельной морфодинамической характеристикой бассейна [*Черноморец, 1991*]. После катастрофы 2000 г. структура литодинамических зон подверглась значительной перестройке. На месте зон промежуточной аккумуляции образовались протяженные участки выноса, причем во многих местах обнажилось ложе из коренных пород. Особенностью долин Каяарты-Су и Герхожан-Су является чередование большого количества литодинамических зон. Из 13 выделенных нами зон 5 являются денудационными, 3 — транзитно-денудационными, 3 — транзитными, 1 — транзитно-аккумулятивной и 1 относится к аккумулятивному типу. Интересно, что наибольший объем выноса (около 1400 $м^3$/пог.м) отмечается не в селевом каньоне в приледниковой зоне, а на участке в среднем течении р. Каяарты-Су.

Объем селевого каньона в верховьях Каяарты-Су был рассчитан дважды: в сентябре 2000 г. и год спустя, в конце августа 2001 г. Это позволило сопоставить масштабы преобразований рельефа во время катастрофы и сразу после нее.

Карта условий формирования селей на этапе после катастрофы как тематическая основа ГИС

Следующим шагом в исследовании бассейна стало изучение условий формирования селей (УФС), изменившихся после катастрофы 2000 г. Для достижения этого целесообразны использование современных технологий и создание геоинформационной системы (ГИС) на изучаемый бассейн. На начальном этапе заложена база будущей ГИС: созданы слои цифровой картографической основы

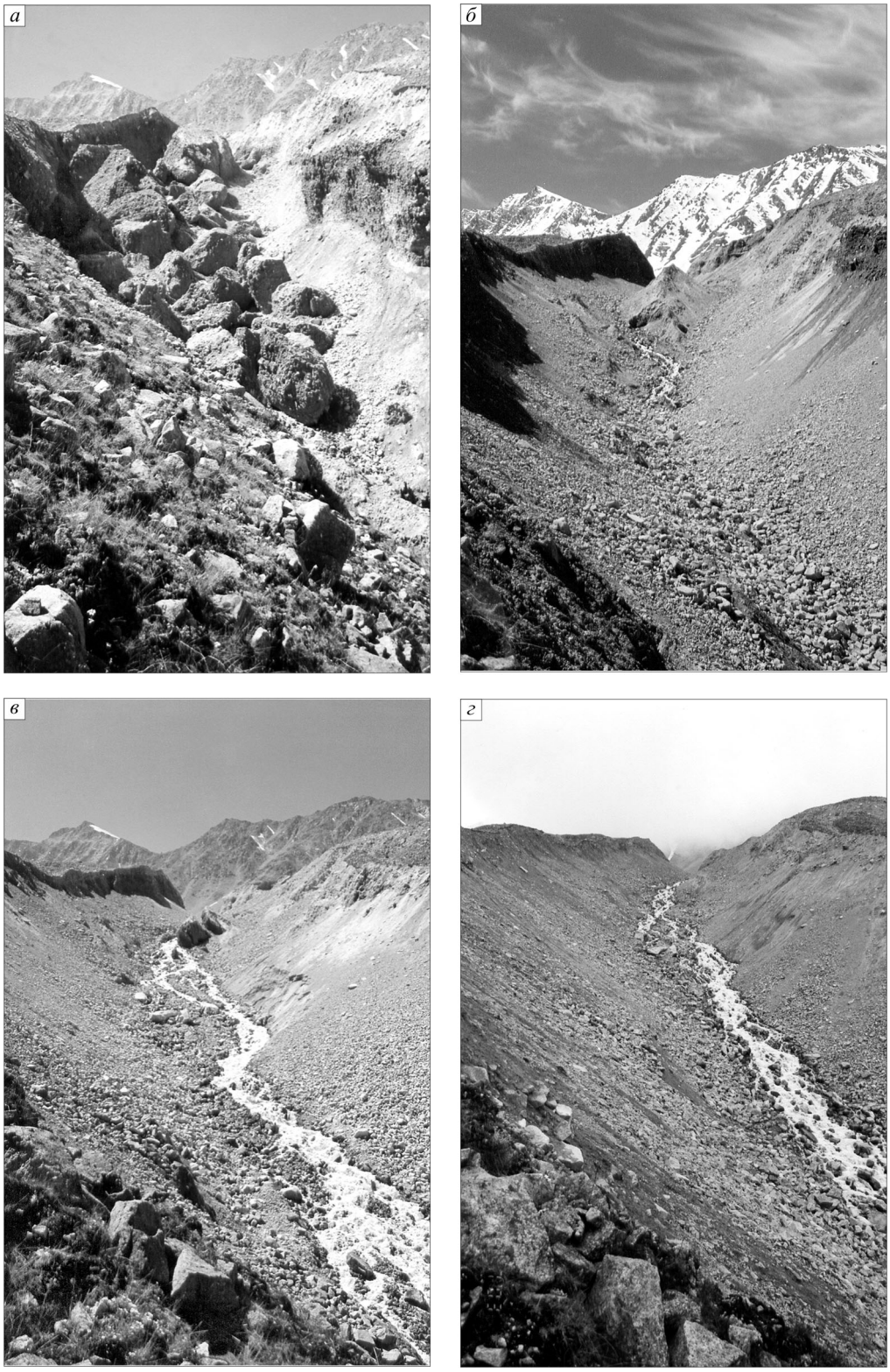

Рис. 2. Повторные снимки селевого каньона Каяарты-Су с закрепленной точки Ф4.
а — 28 июля 2000 г., *б* — 26 июня 2001 г., *в* — 6 августа 2001 г., *г* — 19 июля 2003 г.

и комплекс тематических слоев (карта УФС). Единая цифровая растровая топооснова была создана по топографическим картам м-ба 1:25 000. Карты были отсканированы с разрешением 400 dpi (1,6 м/пикс). Далее в пакете программ ERDAS Imagine была проведена геометрическая коррекция и привязка карт по 197 опорным точкам координатной сетки, со среднеквадратической ошибкой от 6 до 9 м. Основой для картографирования УФС послужили также материалы цифровой аэросъемки от 22 сентября 2000 г., отражающие состояние бассейна после прохождения катастрофических селей. Хотя аэрофотоснимки в изучении селей используются уже несколько десятилетий [*Голубев, Лабутина, 1966, 1968; Садов, 1972, 1978*], опыт использования цифровых аэросъемок для картографирования селей до недавнего времени отсутствовал. Поэтому целесообразно подробнее описать особенности использования цифровых снимков для изучения селей.

Плановая и перспективная цифровая аэросъемка проводилась с вертолета Ми-8 геологическим факультетом МГУ и научно-исследовательской лабораторией „Геологоразведчик“ предприятия „Севосгеологоразведка“. Использовалась камера Nicon Coolpix 950 с широкоугольным конвертером WC-24. Все снимки сделаны в формате JPEG с размером кадра 1600 × 1200 пикс, в естественных цветах. Разрешение плановых снимков в основном варьирует в пределах 0,5—2,0 м. Снимки предоставлены в исходном виде, а также в обработанном — после преобразований контрастности и яркости, призванных убрать атмосферную дымку. Одновременно с аэросъемкой проводилось аэровизуальное обследование бассейна. Корректировка маршрута вертолета и указание наиболее важных объектов позволили сделать снимки особо важных участков с малой высоты и при более детальном разрешении.

В связи с отсутствием метрических аэросъемочных материалов сравнимого качества на нужный период (плановая аэрофотосъемка не была осуществлена из-за плохих условий освещенности), было признано целесообразным использовать материалы цифровой аэросъемки 2000 г. после двухступенчатой геометрической коррекции дисторсии съемочной системы и рельефа местности (ортокоррекция).

На основе рекогносцировочных исследований, анализа фондовых и литературных материалов и дешифрирования материалов цифровой аэросъемки был составлен предварительный вариант карты УФС м-ба 1:10 000, уточненный в период полевых работ 2001—2002 гг. Фрагмент карты в черно-белом варианте приведен на рис. 3. Детальность цифровых аэроснимков была достаточной для дешифрирования объектов картографирования. При дешифрировании использовались цветовые и структурные характеристики снимка (текстура, рисунок). Основные типы объектов опознавались по комплексу морфологических и цветовых признаков (например, бровки селевых врезов — по „рваным“ краям и смене открытого склона на задернованный, каменные глетчеры — по характерным следам течения грунта). Общая площадь картографирования бассейна и прилегающих участков г. Тырныауза составила около 90 км^2.

В ходе разработки легенды были проанализированы условные обозначения геоморфологической, инженерно-геологической карт и карты четвертичных отложений, составлявшихся в м-бах 1:50 000 и 1:25 000 на территорию бассейна в 1960-е и 1970-е годы. Использовались также стандартные условные знаки для геоморфологических карт [*Башенина и др., 1960*] и карт четвертичных отложений [*Типовые условные обозначения..., 1986*]. В результате разработана комплексная легенда, ориентированная на детальное отображение селевых процессов и специфических условий их формирования [*Парамонов и др., 2001*]. Она состоит из следующих основных разделов:

1. Геолого-геоморфологические условия формирования селей.
   1.1. Вершинные поверхности междуречий (5 позиций);
   1.2. Склоны (9 позиций);
   1.3. Долинный комплекс (40 позиций, включая 19 позиций селевых форм).
2. Гидрогеологические и гляцио-криолитологические условия формирования селей.
   2.1. Ледники (2 позиции);
   2.2. Грунтовые воды (1 позиция);
   2.3. Погребенные льды (3 позиции).
3. Прочие обозначения (здания и сооружения в зоне селевой опасности, 9 позиций).

Отдельные позиции разработанной легенды специфичны для бассейна Герхожан-Су, однако она может быть адаптирована для картографирования других селеопасных бассейнов высокогорных территорий.

Приведенную методику картографирования можно рекомендовать для других селевых бассейнов.

Подробные результаты проведенных исследований опубликованы в работах [*Крыленко и др., 2001а,б, 2002а,б; Парамонов и др., 2001; Черноморец, 2003; Tutubalina et al., 2003*].

Выбор объектов и точек мониторинга

Следующим этапом в изучении бассейна стал **выбор ключевых участков**, важных для формирования селей. Они отбирались на основе анализа литературных и картографических материалов, в ходе маршрутных обследований и путем сопоставления фотоснимков, сделанных с маркированных

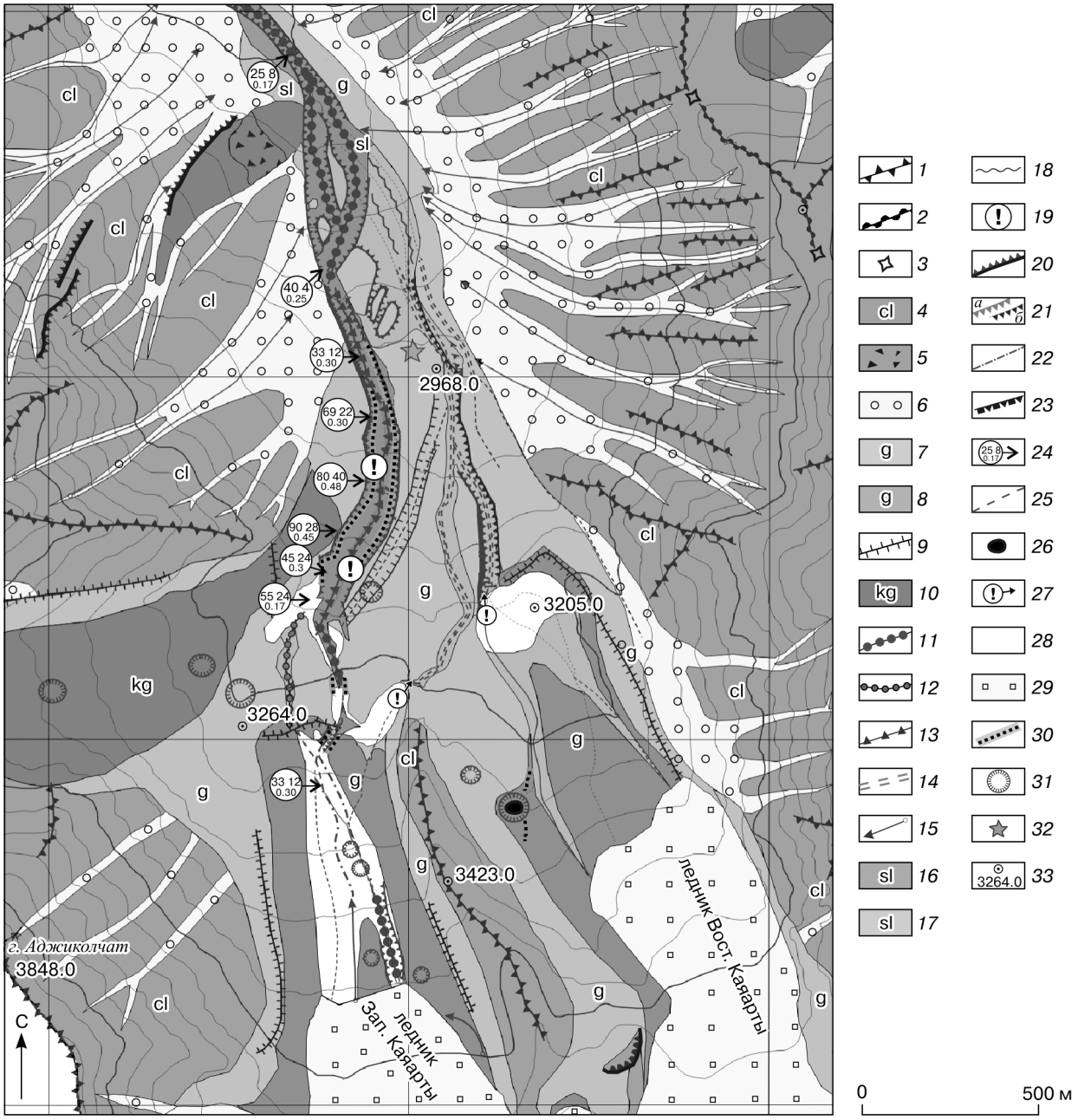

Рис. 3. Фрагмент карты условий формирования селей (черно-белый вариант, с упрощениями).

Вершинные поверхности междуречий: *1* — островершинные гребни, *2* — округловершинные гребни, *3* — седловины. *Склоны*: *4* — обвально-осыпного сноса с участием нивации; *5* — обвальные тела; *6* — обвально-осыпные и лавинно-селевые конусы и шлейфы. *Ледниковые формы*: *7* — морены исторических стадий, *8* — морены современные (XX в.), *9* — валы береговых и конечных морен, *10* — каменные глетчеры. *Селевые формы*: *11* — невыработанные аккумулятивные русла селей 2000 г.; *12* — невыработанные аккумулятивные русла селей предыдущих лет; *13* — русло селей 2000 г., погребенное склоновыми отложениями; *14* — второстепенные селевые рукава; *15* — следы склоновых селей; *16* — селевые отложения 2000 г.; *17* — селевые отложения предыдущих лет; *18* — селевые валы; *19* — места вероятного образования временных запруд в ходе движения селя. *Бровки*: *20* — ледниковых цирков, *21* — селевых врезов: 2000 г. *(а)*, предыдущих лет *(б)*; *22* — эрозионно-селевые 2000 г.; *23* —бровки активизированных селем обвально-осыпных уступов. *24* — ширина, глубина вреза (м), уклон; *25* — тальвеги эрозионных врезов, рытвин и ложбин; *26* — озера в границах сентября 2000 г.; *27* — следы прорыва озер; *28* — зандры. *Ледники и погребенные льды*: *29* — современные ледники по состоянию на сентябрь 2000 г.; *30* — выходы погребенного льда и льдистых грунтов в бортах селевых врезов; *31* — термокарст, просадки; *32* — участок прорыва внутриморенного водоема в 1983 г.; *33* — отметки абсолютных высот.

точек. Критерием выбора таких участков была, во-первых, степень их динамичности; во-вторых, степень их возможного участия в селеформировании. К ключевым участкам в бассейне Герхожан-Су следует отнести:

— предполья ледников Каяарты (фото на обложке журнала);

— селевой каньон р. Зап. Каяарты-Су с прилегающим моренным комплексом;

— участок среднего течения р. Каяарты-Су выше Нижнего ущелья;

— часть долины р. Герхожан-Су, прилегающая к оползню Бузулган.

Выбор точек мониторинга селевых очагов (рис. 4) был обусловлен необходимостью проводить детальные исследования на наиболее динамичных участках. Сеть мониторинга, созданная в период полевых работ 2000—2002 гг., включала несколько типов точек, линий и площадок, маркированных на местности:

1. *Поперечные профили* селевого русла и прилегающих к нему бортов, на которых проводились повторные геодезические съемки, а также измерение величины отступания бровок.

2. *Точки дистанционной съемки*: а) базисы фототеодолитной съемки; б) базисы цифровой стереосъемки — пары жестко закрепленных точек, привязанных с помощью геодезических измерений. Привязка точек проведена также с помощью GPS; в) точки повторной фотосъемки — маркированные точки, с которых несколько раз проводились фотосъемки обычной или цифровой камерой. Привязка точек проведена с помощью GPS, азимут съемки определялся при помощи компаса.

3. *Площадки для изучения криогенных процессов*. На них установлены группы металлических и

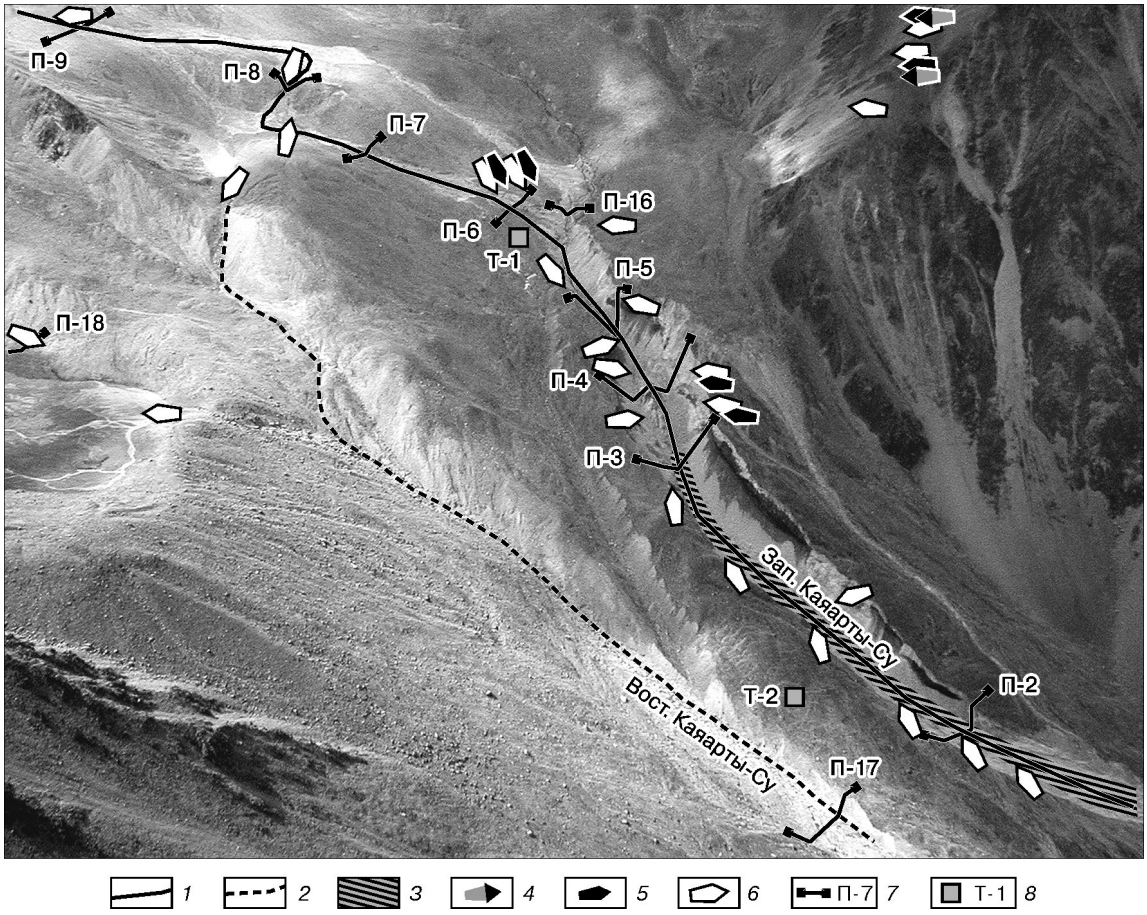

Рис. 4. Селевые очаги на моренах ледников Каяарты и размещение точек мониторинга их морфолитодинамики.

1 — путь движения селей в 2000 г., *2* — путь движения селей в 1977 г., *3* — участок развития микроселей в июле—августе 2000 г. и в июне—августе 2001 г., *4* — точки фототеодолитной съемки, *5* — точки цифровой стереосъемки, *6* — точки повторной фотосъемки, *7* — поперечные профили и их номера, *8* — площадки для изучения криогенных процессов и их номера.

Перспективный аэроснимок выполнен М.Ю. Никитиным 22 сентября 2000 г.

деревянных реперов, по смещению которых и изменению нанорельефа между ними исследовалась динамика поверхности моренного комплекса.

4. *Уровенные посты*. Созданы в 2001 и 2003 гг. на озерах в долине р. Сакашили-Су.

5. *Временный метеорологический пост* в верховьях р. Каяарты-Су (измерения проводились в течение недели в августе 2001 г.).

Режим мониторинга

Режим слежения за объектами может отличаться весьма сильно в зависимости от вида наблюдений и характера объектов. Так, высокоточную фототеодолитную съемку достаточно проводить раз в несколько лет (в зависимости от селевой активности), измерения на поперечных профилях селевого каньона — раз в год, изучение динамики моренного комплекса — 1—2 раза в сезон, метеорологические измерения — ежедневно с начала селеопасного сезона.

Наблюдения за объектами мониторинга, проводившиеся в летние периоды 2001—2003 гг., можно разделить на три основные группы: 1. Слежение за изменением морфометрических характеристик ключевых участков. 2. Изучение особенностей перемещения вещества на ключевых участках. 3. Мониторинг изменения гидрометеорологических условий селеформирования.

Изменение морфометрических характеристик ключевых участков изучалось при помощи инструментальных измерений по закрепленным поперечным профилям. Так, объем селевого каньона р. Зап. Каяарты-Су увеличился с 0,89 млн м^3 в конце сентября 2000 г. до 1,06 млн м^3 в августе 2001 г. В местах, труднодоступных для геодезических измерений, для качественной оценки динамики использовалась повторная фотосъемка с закрепленных точек.

Классическим и наиболее точным методом оценки динамики рельефа в труднодоступных высокогорных районах является фототеодолитная съемка. Была разбита сеть базисов фототеодолитной съемки, включающая ряд ранее использовавшихся при картографировании местности в 1963 и 1977 гг. Попытки фототеодолитной съемки, предпринятые летом 2001 и 2002 гг., оказались неудачными из-за неблагоприятных метеорологических условий. Качество получившихся в эти годы снимков нельзя считать удовлетворительным. В 2003 г. удалось провести кондиционную фототеодолитную съемку, в том числе с использованием старых базисов, что позволит в будущем сравнить состояние селевых очагов в 1963, 1977 и 2003 гг.

Цифровая съемка была использована при исследовании участков, недоступных для фототеодолитной съемки, например, средней и верхней части селевого каньона. Из-за ограниченного объема геодезических работ, точность определения объемов перемещенного материала по результатам цифровой съемки нельзя считать достаточно высокой.

Съемка обычной фотокамерой с закрепленных точек проводилась несколько раз в каждом селеопасном сезоне.

Помимо традиционных инструментальных методов для грубой оценки изменений характеристик ключевых участков были использованы данные космических съемок. Было выявлено, что для верховьев бассейна Каяарты-Су детальность многозональных космических снимков относительно высокого разрешения (15—30 м) недостаточна. На этом участке возможно только использование материалов воздушных, наземных и космических съемок сверхвысокого разрешения (около 1 м). Однако в нижней части селевого бассейна, в особенности на конусе выноса в г. Тырныаузе, в связи с более крупными размерами объектов, использование космических снимков целесообразно и позволяет проводить оперативное картографирование. В частности, на полученном 15 сентября 2001 г. космическом снимке ASTER с разрешением 15 м четко видна прорезь в селевых отложениях 2000 г., созданная для спуска подпрудного посткатастрофического озера на р. Баксан.

Особенности перемещения вещества в селевом врезе наблюдались визуально в течение ряда периодов, что привело к ряду интересных выводов. Перемещение вещества со стенок селевого вреза к его дну осуществляется камнепадами и микроселями. Камнепады отмечались на протяжении всей длины каньона. Микросели зарождались главным образом в термоцирках, образовавшихся в бортах каньона из-за вытаивания погребенного льда. Изучение микроселей проводилось с помощью повторных съемок термоцирков и путем прямых наблюдений за механизмом зарождения селей после грозы. Транспортировка вещества по дну каньона осуществлялась микроселями и наносоводными паводками. Хотя традиционно селевые потоки считаются редким явлением, в течение летних периодов 2000 и 2001 гг. микросели сходили практически ежедневно в интервале времени от 12 до 18—19 ч. Отмечено образование небольших селей эрозионного типа в среднем течении р. Каяарты-Су после обильного периода дождей.

Особого внимания заслуживают наблюдения за динамикой окружения селевого каньона — исторических морен ледников Каяарты и примыкающего к ним каменного глетчера. Были разбиты площадки для измерения скорости раскрытия криогенных трещин в моренном массиве. Проведенные измерения показали отсутствие четко выраженной динамики трещин в пределах точности измерений, что, возможно, связано с низкими летними температурами в сезоны 2002 и 2003 гг. Изучалась динамика каменного глетчера, подходящего к западному краю селевого каньона. Помимо ускорившегося после селевой катастрофы продвижения фронта каменного глетчера, на этом участке каньо-

на отмечается резкое отступание бортов за счет вытаивания погребенного льда, что сопровождается образованием термоцирков диаметром до 30 м.

Наблюдения за изменением гидрометеорологических условий селеформирования были сведены к измерениям осадков и температур воздуха вблизи селевого каньона.

СТАДИИ РАЗВИТИЯ ОЧАГОВ БАССЕЙНА

При разработке методик ранее практически не учитывалось, что селевые очаги могут находиться на разной стадии развития. Между тем, этот аспект должен влиять на особенности исследований. Необходимо учитывать не только структуру, но и состояние бассейна.

На примере ряда селевых объектов Центрального Кавказа, была разработана концепция циклов катастрофического селеформирования [*Черномо-рец, 2003*]. В соответствии с данной концепцией, *цикл катастрофического селеформирования* — период, включающий подготовку катастрофы и потерю устойчивости, действие „спускового механизма", катастрофическое развитие селевого процесса, последующую послекатастрофическую переработку и относительно спокойный длительный период эволюционного развития, протекающий без потери устойчивости геоморфологической системы.

Исследования показали, что цикл состоит из ряда стадий, которые можно назвать следующими терминами: 1) стадия предкатастрофической подготовки; 2) стадия селевой катастрофы; 3) стадия эпикатастрофической (послекатастрофической) адаптации; 4) стадия межкатастрофической эволюции.

Стадию предкатастрофической подготовки на практике удается изучить довольно редко. После катастрофы обычно проходит длительный период, когда о ее последствиях успевают забыть. Долина Герхожан-Су не является исключением. В случае обнаружения признаков предкатастрофической подготовки особенно важными являются аэровизуальные обследования очагов, установка постов и систем оповещения, позволяющих избежать человеческих жертв.

Создание сети мониторинга в бассейне Герхожан-Су началось после катастрофы 2000 г., на стадии эпикатастрофической адаптации. В ходе работ было выявлено, что в период адаптации рельефа происходит затухание интенсивности экзогенных процессов. Исследования показали, что адаптация длилась в течение полутора лет. Границу перехода между стадиями можно установить достаточно определенно. В 20-х числах августа 2001 г. завершилось уничтожение массивов льдистого грунта в днище каньона р. Зап. Каяарты-Су, совпавшее по времени с установлением снежного покрова на уровне концов ледников. В течение двух последующих селеопасных сезонов процесс переработки очагов резко замедлился, что говорит о переходе к стадии межкатастрофической эволюции.

Таким образом, предложенная методика мониторинга разработана преимущественно для стадий эпикатастрофической адаптации и межкатастрофической эволюции.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ МОНИТОРИНГА

Выше изложена разработанная и осуществляемая нами схема мониторинга селевого бассейна Герхожан-Су. Проведенных работ не достаточно для осуществления детального исследования бассейна. В будущем, как представляется, необходимо провести дополнительные исследования, направленные на уточнение ряда характеристик.

Изучение криогенных процессов и линзы льда, обнаруженной в исторических моренах ледников Каяарты вертикальным электрозондированием 1964—1965 гг. Тогда она достигала толщины 40 м и имела площадь 0,5 км^2 [*Рубцов, Сейнова, 1968*]. После селей 2000 г. лед был вскрыт в бортах селевого каньона. Видимая мощность слоев достигала 5—10 м, пласты льда чередовались со слоями льдистого грунта. По всей видимости, в формировании массива погребенного льда в верховьях р. Каяарты-Су участвует не только глетчерный, но и инфильтрационный лед. Массив льда является одним из основных источников увлажнения моренных грунтов, обладающих тиксотропными свойствами и приобретающих при увеличении влажности свойства текучести. Вытаивание льда в бортах каньона может вызвать резкое усиление поступления материала в русло каньона вследствие движения каменного глетчера. Поэтому важно определить современную зону распространения, глубину залегания и толщину линзы льдов и льдистых грунтов.

Наблюдения за формированием микроселей. Если крупные сели отмечаются в бассейне Герхожан-Су весьма редко, то микросели сразу после катастрофы и в течение июля—августа 2001 г. формировались практически ежедневно, а в последующем сходили несколько раз за сезон. Это дает возможность натурным путем определить критические значения ряда параметров селевой массы и селеформирующего грунта (сопротивление сдвигу, пределы текучести, пластичности, максимальная влагоемкость).

Гидрометеорологические и гляциологические наблюдения должны быть направлены на выявление критических параметров схода селей. Необходимо выявить, при каких суммах температур абляция снега и льда на ледниках достигает критической для схода селя величины. Требуется исследовать, при каком количестве осадков возможна трансформация паводка в сель. Одной из задач является выявление метеорологических корреляций между различными высотными зонами долины, поскольку температурные градиенты и изменение количества осадков с высотой имеют нелинейный характер. Такие исследования проводились

для Центрального Кавказа, например [*Тушинский и др., 1966; Мальнева и др., 1990; Сейнова и др., 1998*], но для локального прогноза в отдельно взятом бассейне зависимости пока недостаточно изучены. М.Д. Докукиным было отмечено продвижение селевых очагов вверх по долине вслед за деградирующими ледниками [*Докукин, 1985*]. Поэтому требуется уточнение корреляционных связей между ходом метеорологических элементов, гидрологическими и гляциологическими параметрами. Для этого достаточно детальных измерений абляции по стандартному методу реек и шурфов, сопряженных с измерениями температуры и осадков в приледниковой зоне в течение 1—2 сезонов. Эти наблюдения должны быть дополнены измерениями расхода и мутности воды на гидрологическом створе, который следует разместить на входе в верхнее ущелье р. Каярты-Су.

Интерактивная ГИС. Важно обеспечить хранение всех результатов исследований во взаимоувязанной форме, позволяющей проводить пространственный и временной анализ идущих в бассейне процессов, определять и устранять пробелы в данных, осуществлять оценку текущей ситуации и прогноз. Результатом работ по мониторингу должно стать создание интерактивной ГИС, включающей: топографическую и тематическую основу, точки мониторинга, текущие и исторические значения параметров мониторинга, расчетные формулы на основе выявленных корреляционных связей между гидрометеоэлементами и селеопасностью. Такие слои ГИС, как топографическая и тематическая основа, точки мониторинга, значения параметров мониторинга, уже существуют. Расчетные формулы на начальном этапе следует разработать на основе результатов исследований, проведенных ранее.

Интерактивная ГИС должна включать не только научную информацию, но и пользовательскую оболочку. Суть пользовательской оболочки заключается в способности пользователя ГИС самостоятельно оценивать степень селевой опасности в бассейне на основе закладываемой информации. Если обеспечить передачу результатов мониторинга в единый центр и немедленный ввод новой информации в ГИС, то появится возможность получения оперативной информации о степени селевой опасности как для специалистов, так и для местных органов власти и структур МЧС.

В перспективе следует стремиться к обеспечению возможности постоянного обновления ГИС новыми данными и интерактивной выработки обновленных прогнозных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана и апробирована методика мониторинга одного из наиболее значимых селеопасных объектов России — бассейна Герхожан-Су. Она включает следующие этапы:

1. Создание базовой крупномасштабной карты условий селеформирования.
2. Выбор ключевых участков, точек и объектов мониторинга с учетом стадии развития селевых очагов и индивидуальных особенностей бассейна.
3. Маркировка точек, профилей и площадок мониторинга на местности, определение видов и режима наблюдений.
4. Проведение мониторинговых наблюдений.
5. Создание и периодическое обновление интерактивной геоинформационной системы на основе результатов исследований, обобщение результатов и прогноз селеопасности.

Данная методика применима и в других бассейнах, где горная криолитозона является одним из селеобразующих факторов. Необходима дальнейшая разработка аспектов, связанных с изучением криогенных процессов, комплексом гидрометеорологических и гляциологических исследований и моделированием селевой опасности в рамках интерактивной ГИС. В связи с отмеченными выше особенностями селеобразования в горной криолитозоне целесообразно провести обследование современного состояния селевых бассейнов Кавказа, используя разработанную методику с учетом региональных особенностей.

В последние годы многие специалисты отмечают необходимость составления нового руководства по изучению селей и разработке селезащитных мероприятий [*Виноградов, 2003; Решение..., 2003*], для чего могли бы использоваться и результаты, приведенные в данной статье.

Авторы благодарят всех, кто помогал в подготовке материалов для данной статьи: А.А. Алейникова и Д.А. Парамонова — соавторов при составлении карты условий формирования селей; А.М. Алейникову, П.Г. Журавлеву, И.Н. Крыленко, М.Н. Петрушину, И.Б. Сейнову, Л.С. Черномореч — за участие в сборе и обработке полевых данных. В обсуждении полученных результатов принимали участие: А.Ф. Барановский, Н.К. Кононова, И.В. Мальнева, В.В. Поповнин, Ю.Г. Симонов, А.И. Шеко. Техническую поддержку при организации работ оказали: Н.А. Володичева, А.С. Емкужев, О.А. Гончаренко, Э.В. Запорожченко, Р.Х. Калов, М.Ю. Никитин, А.Д. Олейников, Х.М. Ульбашев, М.М. Хаджиев, С.В. Хаджиева.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ , проекты № 03-05-64792, 03-05-64973, 04-05-65030, и при поддержке программы „Ведущие научные школы“, проекты № НШ-2067.2003.5, НШ-1217.2003.5.

Литература

Башенина Н.В., Леонтьев О.К., Симонов Ю.Г. и др. Легенда геоморфологической карты Советского Союза. М-б 1:50 000—1:25 000. М., Изд-во МГУ, 1960.

Виноградов Ю.Б. Организационные и методологические аспекты создания современной системы расчетов характеристик селевых потоков для нужд строительного проектирования // Защита народно-хозяйственных объектов от

воздействия селевых потоков. Материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пятигорск, 17—21 нояб. 2003 г.). Вып. 1. Новочеркасск—Пятигорск, 2003, с. 3—5.

Висковатов А. О периодическом Казбекском завале // Зап. Кавказского отдела Имп. Рус. геогр. о-ва, кн. VI. Тифлис, 1864, с. 186—219.

Герасимов В.А. Условия образования селей в бассейне р. Герхожан-Су // Тр. ВГИ, 1967, вып. 9, с. 99—114.

Герасимов В.А. О селях 1977 г. в бассейне р. Баксан и некоторые данные о селях последующих лет // Тр. ВГИ, 1985, вып. 62, с. 71—76.

Голубев Г.Н., Лабутина И.А. Дешифрирование селей высокогорий по аэрофотоснимкам // Вестн. МГУ. Сер. 5, геогр., 1966, № 1, с. 48—53.

Голубев Г.Н., Лабутина И.А. Изменения рельефа морен в зоне формирования гляциальных селей (по данным аэрофотосъемок) // Материалы гляциол. исслед. Вып. 14. М., Изд-во АН СССР, 1968, с. 322—325.

Докукин М.Д. К вопросу о процессах формирования и трансформации селей в бассейне р. Герхожан-Су // Тр. ВГИ, 1985, вып. 57, с. 58—71.

Докукин М.Д. Эволюционная модель формирования гляциальных селей р. Каярты-Су (бассейн р. Баксан) // Тр. ВГИ, 1987, вып. 66, с. 33—47.

Запорожченко Э.В. Сели бассейна Герхожан-Су: история проявления, условия формирования, энергетические характеристики // Сб. науч. тр. Северо-Кавказского ин-та по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства ОАО „Севкавгипроводхоз“. Вып. 15. Пятигорск, 2002, с. 80—148.

Золотарев Е.А., Поповнин В.В., Сейнова И.Б. Режим ледника Каярты на Центральном Кавказе — активного селевого очага // Материалы гляциол. исслед. Вып. 43, 1982, с. 69—75.

Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С. Перестройка рельефа в долине Герхожан-Су (Центральный Кавказ) после катастрофических селей 18—25 июля 2000 г. // Устойчивое развитие горных территорий: проблемы регионального сотрудничества и региональной политики горных районов: Тез. докл. участников IV междунар. конф. (Владикавказ, 23—26 сентября 2001 г.). Владикавказ, Ремарко, 2001а, с. 471—472.

Крыленко И.В., Петраков Д.А., Черноморец С.С. Оценка условий формирования селей в бассейне Герхожан-Су и рекомендации по защите города Тырныауза // Там же, с. 469—471.

Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Морфодинамика горного бассейна после селевой катастрофы // Состояние и развитие горных систем (Материалы науч. конф. по монтологии). СПб., РГО, 2002а, с. 93—99.

Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. О влиянии криогенного фактора на механизм формирования селей // Экстремальные криосферные явления: Фундаментальные и прикладные аспекты. Материалы междунар. конф. Пущино, 2002б, с. 145—146.

Мальнева И.В., Сейнова И.Б., Кононова Н.К., Берковченко С.А. Прогноз гляциальных селей в центральной части Главного Кавказского хребта // Материалы гляциол. исслед. Вып. 69, 1990, с. 50—55.

Методические указания по ведению государственного водного кадастра. Раздел 1. Поверхностные воды. Вып. 1. Составление и подготовка к печати изданий серии 1: „Каталожные данные“. Ч. 4. Каталог селевых бассейнов и очагов на территории СССР. Алма-Ата, 1989а, 66 с.

Методические указания по ведению государственного водного кадастра. Раздел 1. Поверхностные воды. Вып. 3. Составление и подготовка к печати изданий серии 2: „Ежегодные данные“. Ч. 4. Ежегодные данные о селевых потоках. Алма-Ата, 1989б, 94 с.

Методическое руководство по комплексному изучению селей / Под ред. М.В. Чуринова, А.И. Шеко. М., Недра, 1971, 158 с.

Парамонов Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Геоинформационное картографирование бассейна Герхожан-Су (Центральный Кавказ) для подготовки к мониторингу селевых процессов // Устойчивое развитие горных территорий: проблемы регионального сотрудничества и региональной политики горных районов: Тез. докл. участников IV междунар. конф. (Владикавказ, 23—26 сентября 2001 г.). Владикавказ, Ремарко, с. 476—477.

Решение Международной научно-практической конференции „Защита народно-хозяйственных объектов от воздействия селевых потоков“ (17—21 ноября 2003 г.). Пятигорск, 2003, 4 с.

Рубцов Е.А., Сейнова И.Б. Комплексное изучение селеопасного района города Тырныауза // Селевые потоки и горные русловые процессы. Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1968, с. 297—303.

Руководство по изучению селевых потоков. Л., Гидрометеоиздат, 1976, 144 с.

Руководство селестоковым станциям и гидрографическим партиям. Вып. 1. Организация и проведение работ по изучению селей. М., Гидрометеоиздат, 1990, 198 с.

Садов А.В. Аэрометоды изучения селей. М., Недра, 1972, 126 с.

Садов А.В. Изучение экзогенных процессов аэроландшафтным методом. М., Недра, 1978, 151 с.

Сейнова И.Б. Селевые процессы бассейна р. Баксан в последнем тысячелетии (Центральный Кавказ). М., 1997, 295 с. Деп. ВИНИТИ № 9763-В97.

Сейнова И.Б., Рубцов Е.А. Причины селевой активности в бассейне р. Герхожан-Су // Тр. ГГИ, 1967, вып. 141, с. 121—126.

Сейнова И.Б., Мальнева И.В., Кононова Н.К. Изменение активности и прогноз гляциальных селей Центрального Кавказа в XX столетии // Материалы гляциол. исслед., 1998, вып. 84, с. 114—120.

Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Ледники и сели Приэльбрусья (Эволюция оледенения и селевой активности). М., Науч. мир, 2001, 204 с.

Типовые условные обозначения для карт разного геологического содержания. Карта четвертичных отложений. Л., ВСЕГЕИ, 1986, 14 с.

Тушинский Г.К., Попов А.И., Голубев Г.Н. и др. Опыт изучения гляциальных селей Большого Кавказа (на примере реки Герхожан-Су бассейна р. Баксана) // Инф. сб. о работах по МГГ, 1966, № 13, с. 5—106.

Флейшман С.М., Сейнова И.Б., Золотарев Е.А. Формирование гляциальных селей непрорывного генезиса в бассейне Герхожан-Су на Северном Кавказе // Материалы гляциол. исслед., 1979, вып. 35, с. 195—198.

Хатисян Г. Краткий очерк действий двух Комиссий для исследования Казбекских ледников в 1862 и 1863 гг. // Зап. Кавказского отдела Имп. Рус. геогр. о-ва, кн. VI, 1864, № 2, с. 220—230.

Черноморец С.С. Расчет объема селевой массы // Транспортное строительство, 1991, № 11, с. 4—6.

Черноморец С.С. Особенности морфолитодинамики селевых очагов Центрального Кавказа после катастрофических селей. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2003, 23 с.

Tutubalina O., Chernomorets S., Paramonov D., Petrakov D. Remote sensing for glacial hazards monitoring in the Caucasus Mountains, Russia // Proc. of the 30th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment (Honolulu, Hawaii. November 10—14, 2003). CD-ROM, 4 p.

Поступила в редакцию
2 февраля 2004 г.