

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.4.042

СТОК НАНОСОВ НА МАЛОМ ПРИЛЕДНИКОВОМ ВОДОСБОРЕ (ОСТРОВ КИНГ ДЖОРДЖ (ВАТЕРЛОО), АНТАРКТИКА)

В.Н. Голосов¹, Б.Р. Мавлюдов², С.В. Харченко³, А. Навас⁴,
Л. Гаспар⁵, И. Лизага⁶, А. Кастильо⁷

^{1,3} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет

¹⁻³ Институт географии РАН

^{4,5} Испанский национальный исследовательский совет, Сарагоса, 50059, Испания

⁶ Гентский университет, 9000, Гент, Бельгия

⁷ Южный университет Чили, Лас Энсинас, 220, Вальдивия, Чили

¹ Лаборатория эрозии почв и русловых процессов, вед. науч. сотр., д-р геогр. наук;
e-mail: gollossov@gmail.com

² Отдел гляциологии, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: bulatrm@bk.ru

³ Кафедра геоморфологии и палеогеографии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук;
e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

⁴ Экспериментальная станция Аула Деи, проф., д-р геогр. наук; e-mail: anavas@eead.csic.es

⁵ Экспериментальная станция Аула Деи, постдок, канд. геогр. наук; e-mail: lgaspar@eead.csic.es

⁶ Департамент зеленой химии и технологии, постдок, канд. геогр. наук; e-mail: Ivan.Lizaga@UGent.be;

⁷ Институт химических наук, проф., д-р геогр. наук; e-mail: acastill@uach.cl

Глобальные климатические изменения наиболее значимо повлияли на приполярные регионы. Повышение температуры воздуха стимулировало таяние ледников в Арктике и Антарктике, что способствовало изменениям в формировании стока воды и наносов. Однако количественных оценок особенностей перераспределения наносов в приледниковых водосборах приполярных регионов крайне мало. Особенности стока воды и наносов исследованы в пределах водосбора ручья Корабельный, расположенного на полуострове Файлдс в Антарктиде рядом с ледниковым куполом Беллинсгаузен. Основная цель исследования состояла в изучении условий формирования стока воды и наносов и выявлении долевого вклада в сток наносов ручья продуктов смыва и размыва, поступающих с приледниковой и внеледниковой частей его водосбора. Набор методов и подходов, включая: а) оценки индекса связности потоков наносов; б) метод поиска питающих провинций; в) гидрометеорологические наблюдения; г) крупномасштабную геоморфологическую съемку, был использован для выявления условий формирования поверхностного стока и смыва, механизмов перераспределения наносов в различных звеньях флювиальной сети и количественной оценки соотношения долевого вклада различных источников наносов в сток наносов ручья. Для проведения геохимических и спектрометрических анализов почв и отложений использовалась фракция с размером частиц ≤ 63 мкм. Всего было проанализировано содержание в общей сложности 34 элементов: 6 радиоизотопов, а также 28 стабильных элементов. Установлено, что, несмотря на существенные различия в строении рельефа приледниковой и внеледниковой частей водосбора, индексы связности потоков наносов достаточно близки и составляют $-1,35$ и $-1,79$ соответственно. Значительная часть материала, транспортируемого временными потоками со склонов водосбора, переоткладывается в понижениях рельефа, частично занятых водоемами. Основной объем наносов, составляющий не менее 60–66% от суммарного стока наносов, в замыкающем створе ручья Корабельного поступает с приледниковой части водосбора. Это связано с повышенными относительно внеледниковой части водосбора расходами воды, формирующимися за счет таяния снега и льда, наплавающих на ледниковом куполе, высокой размываемостью моренных отложений, не защищенных растительным покровом, и наличием ледяного ядра в моренах, которое препятствует фильтрации воды.

Ключевые слова: глобальные изменения климата, перераспределение наносов, эрозия, аккумуляция, морена

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.1

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия характеризуются значительными климатическими изменениями, которые наиболее ощутимы в приполярных областях [Mokhov, Parfenova, 2021]. В Антарктике тренд повышения температур выявлен только в пределах Антарктического полуострова с 1960-х гг., а начиная с 2000-х гг. дальнейшего повышения среднегодовых температур не наблюдается, хотя отмечается высокая межгодовая вариабельность [Turner et al., 2019]. Повышение температур воздуха, зафиксированное в Арктике, провоцирует увеличение стока воды и наносов на водосборах малых ручьев и рек [Beel et al., 2018] и способствует росту стока наносов в Мировой океан [Syvitski, 2002]. Немногочисленные данные об условиях формирования стока воды и наносов на малых приледниковых водотоках Антарктического полуострова [Rosa et al., 2014; Kavan et al., 2017] указывают на то, что они в целом аналогичны условиям, наблюдающимся на приледниковых водотоках различных частей арктической зоны [Hodson et al., 1998; Hodgkins et al., 2003].

Широко используемые подходы к оценке особенностей поступления наносов с различных участков исследуемого водосбора в постоянный водоток включают метод поиска питающих провинций (ППП) [Koiter et al., 2013; Owens et al., 2016] и расчет коэффициента доставки наносов на основе выявления связности потоков наносов [Borselli et al., 2008]. Каждый из этих подходов имеет свои ограничения. Метод ППП наиболее эффективен для различных источников наносов, генетически отличающихся друг от друга, которые содержат в своем составе химические элементы или другие измеряемые свойства (цвет, органическое вещество и т. д.) химически пассивные при транспортировке наносов со склона и могут быть идентифицированы уже в стоке наносов водотока [Collins et al., 1996; Haddadchi et al., 2013]. Достоверность оценок долевого вклада различных источников в сток наносов возрастает с ростом числа подобных трассеров, используемых в расчетах [Lizaga et al., 2020]. Использование данного метода предполагает гидро-геоморфологическую оценку путей доставки наносов со склонов и их последующего транспорта в постоянном водотоке.

Расчет связности потоков наносов, который базируется на анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР), отчасти количественно характеризует особенности путей доставки наносов в различных частях водосбора [Cavalli et al., 2013]. Но при этом должно учитываться проективное покрытие поверхности склонов растительностью, во многом определяющее возможности склонового потока

производить отрыв частиц почвы или отложений и их последующую транспортировку [Coulthard, Van De Wiel, 2017]. Использование набора методов и подходов позволяет охарактеризовать механизмы формирования стока наносов для конкретного водосбора без проведения длительных мониторинговых наблюдений.

Цель данного исследования состоит в оценке условий формирования стока наносов на водосборе малого приледникового водотока, расположенного на западе острова Кинг-Джордж (Ватерлоо), и оценке долевого вклада основных источников наносов, поставляющих материал, смываемый с площади водосбора во временные водотоки и непосредственно в основной ручей.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водосбор ручья Корабельный располагается на полуострове Файлдс острова Кинг Джордж (Ватерлоо), который является самым большим островом в архипелаге Южных Шетландских островов (рис. 1). Ручей протекает вдоль западного края ледникового купола Беллинсгаузен. Его водосбор общей площадью 2,83 км² состоит из двух частей. Первая, приледниковая, включает ледниковую часть водосбора площадью 1,16 км² [Braun et al., 2001] и область распространения отложений краевых морен ледника, которая протягивается поясом вдоль края ледника и имеет площадь 0,32 км². Остальная часть водосбора площадью 1,35 км² занимает восточную часть Центрального массива (возвышенность Дейвиса) и разделяющую ее и ледник приморскую равнину. Данная часть водосбора сложена коренными породами, местами перекрытыми маломощным чехлом рыхлообломочных отложений различного генезиса (кора выветривания коренных пород, делювиальные отложения, аллювий), на которых сформировались почвы мощностью 10–15 см, представленные литоземами, петроземами и криоземами [Абакумов, Андреев, 2011].

В составе растительного покрова на внеледниковой части водосбора преобладают низшие растения – лишайники, мхи, грибы, водоросли. Они, наряду с сосудистыми растениями, представленными щучкой *Deshampsia antarctica* [Абакумов, Андреев, 2011], формируют преимущественно разреженный растительный покров с проективным покрытием 0–80%. Граница между приледниковой и внеледниковой частями водосбора проходит по внешнему краю вала конечной морены ледника. Морена с ледяным ядром протягивается вдоль ледника, но прерывается достаточно широким понижением, по которому сток с ледника и приледниковой части водосбора поступает в озеро Месяц, служащее истоком ручья Корабельного (см. рис. 1).

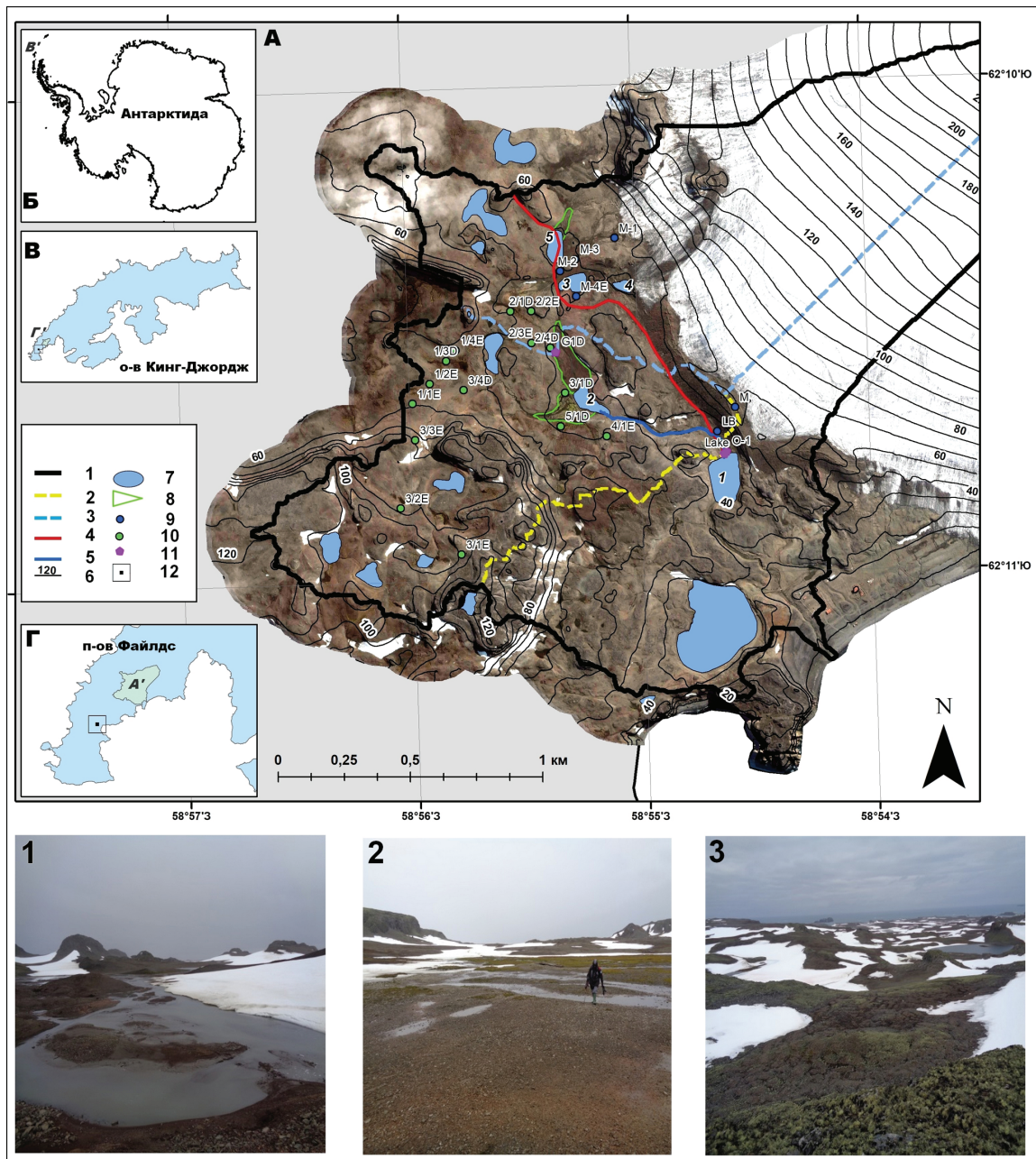


Рис. 1. Расположение водосбора руч. Корабельный в пределах полуострова Файлдс и гидрографическая сеть ручья: 1 – граница водосбора; 2 – граница подводосбора точек отбора проб грунта на берегу и дне оз. Приледникового; 3 – граница подводосбора точки отбора проб в котловине оз. Месяц; 4 – граница внеледниковой и приледниковой частей водосбора; 5 – исследованный участок руч. Корабельный; 6 – изолинии, м над уровнем моря; 7 – озера (1 – Приледниковое; 2 – Месяц; 3–5 – мелкие водоемы, улавливающие часть наносов, поступающих из приледниковой области); 8 – дельты ручьев, впадающих в оз. Месяц; 9 – точки пробоотбора в приледниковой области; 10 – точки пробоотбора во внеледниковой области; 11 – точки отбора смешанных проб в областях аккумуляции наносов; 12 – метеостанция. Фотографии: 1 – временный водоем, сформировавшийся по краю ледника; 2 – приморская равнина, слева уступ Центрального массива; 3 – рельеф Центрального массива с отдельными озерными котловинами, перехватывающими значительную часть стока воды и наносов

Fig. 1. Location of the catchment of the Korabelny Stream within the Fildes Peninsula and the hydrographic network of the stream: 1 – boundary of the catchment; 2 – boundary of the catchment above the locations where sediment mixtures were taken upstream from the Prilednikovoe Lake and from bottom of this lake; 3 – boundary of the catchment above the location where a sediment mixture was taken near the Lake Mesyats; 4 – boundary between the proglacial and periglacial parts of the catchment; 5 – studied reach of the Korabelny stream; 6 – contours, m a.s.l.; 7 – lakes (1 – Prilednikovoe; 2 – Mesyats; 3–5 – shallow waterbodies trap some sediment transported from the glacierized part of the catchment); 8 – deltas of Lake Mesyats; 9 – sampling points of sediment sources in the glacierized part of the catchment; 10 – sampling points of sediment sources in the periglacial part of the catchment; 11 – sampling points of sediment mixtures; 12 – the meteorological station. Photos: 1 – temporary water body formed along the edge of the glacier; 2 – coastal plain and on the left outcrop of the Northern Tablelands; 3 – relief of the Northern Tablelands with separate lake catchments intercepting a significant part of the water and sediment runoff

Коренные породы водосбора ручья представлены в основном магматическими лавами различного состава. Согласно [Smellie et al., 1984], вдоль края ледника полосой протягивается андезит-дацитовая лава. За ней следует расширяющаяся к западу полоса базальтовой лавы. Часть Центрального массива сложена агломератами и также андезит-дацитовыми лавами. Эти участки разделены интрузией основного и среднего состава.

Центральный массив возвышается над окружающей его приморской равниной, сформировавшейся в период повышения уровня моря. Он отделяется от равнины достаточно крутым уступом, местами прорезанным эрозионными понижениями. Относительные высоты в пределах водосбора ручья составляют около 70–80 м. Склоны в пределах Центрального массива достаточно короткие и часто крутые. В пределах приморской равнины преобладают склоны средней длины вогнутой формы, что создает условия для переотложения части наносов у их подножий. Для приледниковой части водосбора

характерно наличие моренных гряд и понижений. Часть понижений в сезон абляции трансформируется в неглубокие водоемы, которые из-за небольших размеров и малой глубины являются проточными. Краевая моренная гряда с ледяным ядром имеет крутой внешний склон, обращенный к днищу притоков ручья Корабельный. Перед участком понижения моренной гряды сохранились небольшие моренные холмы.

Для района исследований характерны относительно небольшие внутригодовые перепады температур воздуха и умеренное количество осадков, которое составляет в среднем 700 мм/год. Несмотря на большие запасы снега и отсутствие низких температур в холодное время года, промерзание почвы распространено повсеместно в пределах водосбора. Постоянный сток в ручье Корабельном формируется в период сезона абляции, продолжающегося с декабря по март, иногда до начала апреля, когда среднемесячные температуры воздуха положительные (табл. 1).

Таблица 1
Некоторые метеорологические характеристики теплого времени года (декабрь–март)
за период 2009–2020 гг.

Параметры	2009/2010	2010–2014	2014/2015	2015–2019	2019/2020
Средняя температура в XII/I/II/III месяце, °C	0,1/0,5/0,2/0,0	–0,4/0,8/0,9/0,3	0,4/0,7/1,4/0,8	0,3/1,1/1,3/0,8	0,5/2,7/2,5/0,8
Средняя температура за декабрь–март, °C	0,2	0,4	0,65	0,88	1,6
Продолжительность периода абляции, дни	124	110	117	128	156
Сумма среднесуточных $T > 0$, °C	98,6	116,7	108,9	141,2	250,3
Число дней с $T > 0/T < 0$	84/40	87/23	86/31	97/31	118/38
Доля дней с $T < 0$ в течение сезона абляции, %	32	21	27	24	24
Количество атмосферных осадков за декабрь–март, мм	258,9	222,7	250,6	259,7	240
Число дней с дождем/с дождем и снегом или со снегом за декабрь–март	21/67	51/43	75/34	60/55	38/21
Число дней с туманами	–	23	33	41	–

Для полуострова Файлдс отмечается тренд постепенного роста температур воздуха в теплое время года, прерывавшийся понижением температуры в 2012–2013 гг. Летом в среднем выпадает около трети годового слоя осадков, преимущественно в виде дождя, дождя со снегом или мокрого снега. Сход снега с площади водосбора ручья происходит постепенно, и к началу января площадь проталин

начинает превышать 50%. Именно после этого начинается формирование стока наносов. Установлена достаточно тесная связь между ходом температуры воздуха и расходами воды для большей части сезона абляции [Chinarro, 2014]. Исключением являются начальный и заключительный периоды, на долю которых приходится от трети до четверти от общей продолжительности сезона абля-

ции, когда ночные температуры регулярно переходят через 0° [Chinargo, 2014]. Для основной части сезона абляции, составляющего в разные годы от 2,5 до 4–5 месяцев (см. табл. 1), характерна положительная температура воздуха в течение всех суток с редкими понижениями ночных температур ниже нуля, что способствует непрерывному таянию снега и льда.

Гидрографическая сеть водосбора ручья включает серии озер и временных водоемов, формирующихся в основном в приледниковой части водосбора, в том числе и в его основном русле (см. рис. 1). Большая часть стока с внеледниковой и приледниковой частей водосбора, состоящих из приморской равнины (см. рис. 1-1) и Центрального массива (возвышенность Дейвиса) (см. рис. 1-2), поступает в озеро Месяц.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполнения основной задачи исследований, состоящей в количественной оценке долевого вклада наносов, поступающих в ручей Корабельный с приледниковой и внеледниковой частей водосбора, применялись два независимых метода. Для использования метода ППП в пределах внеледниковой части бассейна ручья было выделено пять подводосборов, поставляющих наносы в русла временных и постоянных водотоков. В пределах каждого подводосбора были отобраны пробы почв на склонах и переотложенных наносов в днищах понижений (см. рис. 1). Приледниковая часть рассматривалась как единый подводосбор. Здесь были отобраны пробы отложений морены и наносов. В качестве смешанных были отобраны три пробы свежих наносов, отложившихся на участках впадения временного водотока, дренирующего большую часть приледниковой и восточную часть внеледниковой частей водосбора в озеро Месяц, также пробы из ручья Корабельного в месте впадения его в озеро Приледниковое и донных наносов из озера Приледникового.

Каждая проба отбиралась в 3–4 укола с помощью пробоотборника с внутренним диаметром 5 см с поверхности до глубины 1,8 см. Проба донных отложений отобрана из озера Приледникового пробоотборником USC 06000 фирмы UWTEC с внутренним диаметром 6,3 см. Для целей данного исследования использовался только приповерхностный слой данной пробы мощностью 2,5 см.

Всего для аналитических работ в лаборатории было отобрано 23 пробы почвы и отложений. Образцы почв и наносов были высушены, измельчены, гомогенизированы и просеяны. Для проведения анализов использовалась фракция с размером частиц ≤ 63 мкм, которая была выделена методом сухого просеивания после сушки, измельчения и

перемешивания навески [Owens et al., 2016]. Размер зерен во фракции ≤ 63 мкм анализировали методом лазерной дифрактометрии после удаления органического вещества. Всего было проанализировано содержание в общей сложности 34 элементов: 6 радиоизотопов и 28 стабильных элементов [Navas, Machin, 2002].

Органический углерод почвы (SOC), а также фракции активного и стабильного углерода анализировали с помощью многофазного анализатора углерода LECO RC-612 (LECO Corporation, Сент-Джозеф, Мичиган, США, LECO). Фракционирование фракций SOC проводили в соответствии с протоколами. Содержание неорганического углерода в почве (SIC) (%) анализировали с использованием метода кальциметра давления [Gaspar et al., 2019].

Анализы радиоизотопов ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K проводились с использованием сверхчистого германиевого коаксиального гамма-детектора с высоким разрешением и низким фоном (Canberra Xtra, КПД 50%, разрешение 1,9 кэВ). Калибровка проводилась с использованием стандартных сертифицированных образцов той же геометрии, что и измеряемые образцы. Активность ^{137}Cs определяли по фотопику 661,6 кэВ; ^{210}Pb измерено при 46,5 кэВ; ^{226}Ra определяли по линии 351,9 кэВ ^{214}Pb , короткоживущих дочерних изотопов ^{226}Ra , после достижения равновесия. Атмосферную составляющую $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ оценивали вычитанием содержания ^{226}Ra из общего ^{210}Pb ; ^{238}U определен по линии 63 кэВ ^{234}Th ; ^{232}Th оценивался по фотопику ^{228}Ac с энергией 911 кэВ, а ^{40}K определялся по фотопику с энергией 1461 кэВ. Время счета 86 400 с. Активность радионуклидов определялась в Бк/кг сухой почвы.

Анализ долевого вклада наносов, поступающих в озеро Месяц и далее в озеро Приледниковое, произведен с использованием алгоритма FingerPro (пакет языка R) [Lizaga et al., 2020]. Все трассеры были протестированы на предмет возможности их использования для определения долевого вклада наносов, поступающих из двух основных источников.

Для выявления вклада различных источников в наносы, отобранные на участке впадения ручья Корабельного в озеро Месяц, оказались репрезентативными следующие трассеры: гранулометрический состав наносов – массовая доля алеврита (63–2 мкм), содержание ^{232}Th , концентрация В, общий углерод, а также его стабильная фракция. Для наносов, отобранных на участке впадения ручья Корабельного в озеро Приледниковое и в самом озере (приповерхностный слой донных отложений), репрезентативны концентрации Р, Ti, Pb, Al, Na, Ca, ^{137}Cs , ^{226}Ra .

Другой подход к оценке долевого вклада различных частей водосбора ручья Корабельного в сток

наносов базируется на оценке индекса связности потоков наносов [Borselli et al., 2008; Cavalli et al., 2013]. Для картирования данного индекса использовалась цифровая модель рельефа REMA с разрешением 2 м [Howat et al., 2022]. Подход основан на расчете отношения шансов отрыва рыхлообломочных частиц и доставки их в приемный бассейн. Восходящая составляющая пропорциональна средним значениям топографической шероховатости и крутизны выше по склону, квадратному корню из водосборной площади, нисходящая – прямо пропорциональна длине склона, обратно пропорциональна топографической шероховатости и крутизне участка склона в пикселе, для которого проводится расчет. Их соотношение тем выше, чем выше шансы на отрыв частиц от поверхности и ниже вероятность их переотложения вниз по падению склона. От логарифма отношения шансов (connectivity index) нетрудно перейти к вероятности сноса и доставки рыхлообломочных частиц в приемный бассейн/устьевую точку водосбора – коэффициенту доставки наносов (sediment delivery ratio, SDR) согласно следующему выражению:

$$SDR = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC}{k}\right)},$$

где IC_0 – нулевое значение индекса связности потоков наносов, выше которого преобладает вынос и транзит наносов, ниже аккумуляция. Чаше используется значение 0,5, хотя этот параметр нуждается в калибровке на местности и может быть как меньше, так и больше этой величины; IC – рассчитанное значение индекса связности потоков наносов в каждом пикселе; k – параметр формы связи между индексом связности потоков наносов и SDR. Чем он ниже, тем более резок скачок в доле доставляемых в приемный бассейн наносов из мобилизованной их массы. В первом приближении он может быть равен 1.

Само значение вклада разных частей водосбора в итоговый баланс наносов рассчитывалось для этих частей как произведение их площади и среднего SDR. Затем суммарная величина для всего водосбора принималась за 100%, и определялись доли каждой из частей.

Так как коэффициент доставки наносов зависит от проективного покрытия поверхности почв (ПРПП) или отложений растительностью, то необходимо учитывать изменения ПРПП по площади водосбора. Для приледниковой части водосбора оно неизменно в период снеготаяния и фактически равно 0 (рис. 2А). В пределах приморской равнины ПРПП изменяется по площади и по мере схода снега варьирует от 0 до 60–80%. Растительностью осваиваются в основном плоские участки в по-

нижениях (см. рис. 2Б). На склонах возвышенных участков на приморской равнине наибольшая густота растительного покрова отмечена в верхних частях склонов (см. рис. 2В), тогда как вниз по склону ПРПП снижается до 0–20%. Аналогичная ситуация характерна и для склонов Центрального массива, но здесь ПРПП на привершинных участках достигает 80% (см. рис. 2Г).

Для анализа используются данные метеорологических наблюдений на станции Беллинсгаузен, расположенной к западу от водосбора (см. табл. 1). Визуальные наблюдения за динамикой схода снега и особенностями формирования стока воды на водосборе ручья Корабельного в период снеготаяния выполнялись в период 2011–2020 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Формирование стока воды и наносов на водосборе ручья Корабельного контролируется в основном двумя факторами – особенностью строения рельефа и динамикой схода снега. Причем для внеледниковой и приледниковой частей водосбора оба эти фактора достаточно тесно взаимосвязаны. Рельеф определяет особенности накопления и схода снежного покрова. В пределах внеледниковой части водосбора снег сдувается с привершинных участков и накапливается в понижениях. В результате именно привершинные участки склонов раньше освобождаются от снега. Это приводит к тому, что на начальной фазе снеготаяния происходит постепенное насыщение оттаивающей почвы влагой. По мере появления проталин на привершинных участках формирующийся поверхностный сток уже в средних частях склона фильтруется в сохранившиеся снежники. Фактически размыв поверхности почвы начинается только с момента появления проталин. Это способствует более быстрому добеганию стока до ложбинных понижений, в которых происходит концентрация стока воды. Формирующиеся таким образом в ложбинах потоки способны прорезать русла в снежниках, сохранившихся на их пути. По мере слияния отдельных потоков уже на плоских участках понижений приморской равнины потоки, частично разгружаясь от транспортируемых наносов, впадают в расположенное в центре водосбора озеро Месяц.

В приледниковой части водосбора моренные валы, протягивающиеся перед ледником, и собственно сам ледниковый купол служат естественным барьером для перемещения снега, так как в холодное время года преобладают западные и северо-западные ветры. Это способствует накоплению больших запасов снега на западном склоне моренных валов и во фронтальной части ледника, обра-

щенной в сторону водосбора ручья Корабельного. В результате в первую очередь от снега освобождаются привершинные участки моренных холмов. Лед, сохранившийся в теле моренных холмов, препятствует фильтрации влаги и даже на привершинных частях моренных холмов формируются микро-водоемы, которые, переполняясь, в виде микроселей сбрасывают воду и наносы вниз по крутым склонам валов, прорезая в них русла и частично откладывая наносы.

Аналогично, в начале сезона абляции по периферии самого ледника формируется несколько довольно крупных водоемов, которые наполняются талой

водой. В дальнейшем сток из этих водоемов формирует сеть временных водотоков, которые в итоге, сливаясь в единый ручей, поставляют наносы в озеро Месяц. При этом временные водоемы являются одновременно и ловушками наносов.

В целом, особенности строения рельефа водосбора руч. Корабельного такова, что путь транспорта смытого материала со склонов в днище долины ручья проходит через участки с низкими значениями индекса связности потоков наносов. Данные участки присутствуют как внутри Центрального массива и на приморской равнине, так и в приледниковой части водосбора (рис. 3).

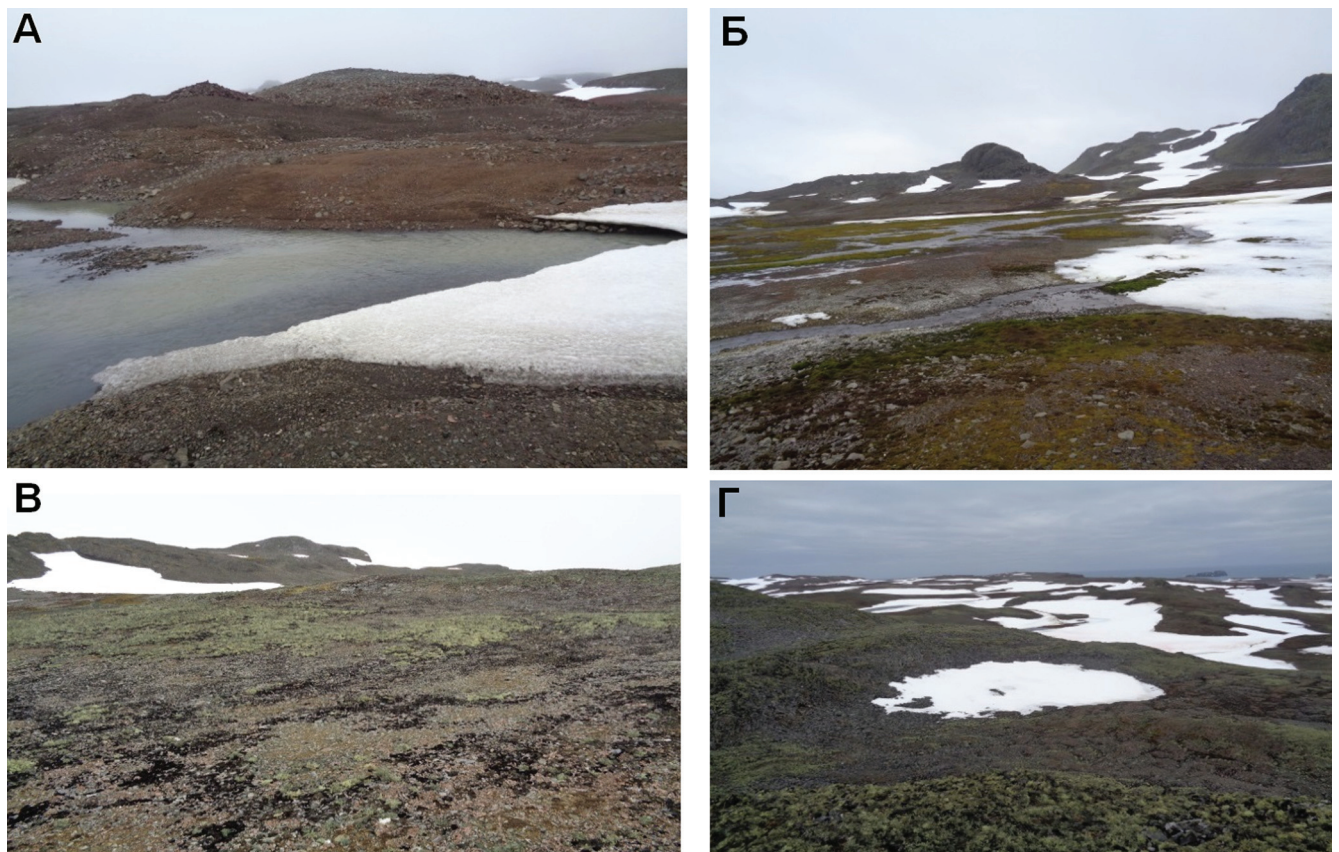


Рис. 2. Проективное покрытие почвы и отложений растительностью на различных участках водосбора руч. Корабельного: А – моренные валы приледниковой части водосбора, сложенные отложениями различной крупности; Б – плоские участки понижений приморской равнины; В – склоны холмов на приморской равнине; Г – привершинные участки склонов Центрального массива

Fig. 2. Protective vegetation cover of soil in different parts of the Korabelny Stream catchment: А – moraine swells of the glacierized area, comprising folded deposits of various sizes; Б – flat areas within depressions of the coastal plain; В – upper part of slopes on the coastal plain; Г – near-top areas of the slopes of the Northern Tablelands

Для части водосбора ручья, расположенного к востоку от озера Месяц и собирающего сток воды преимущественно с приледниковой области водосбора, согласно индексу связности потоков наносов

основной объем смытого материала формируется именно в этой его области (табл. 2). Аналогичные результаты получены и при использовании метода ППП (см. табл. 2).

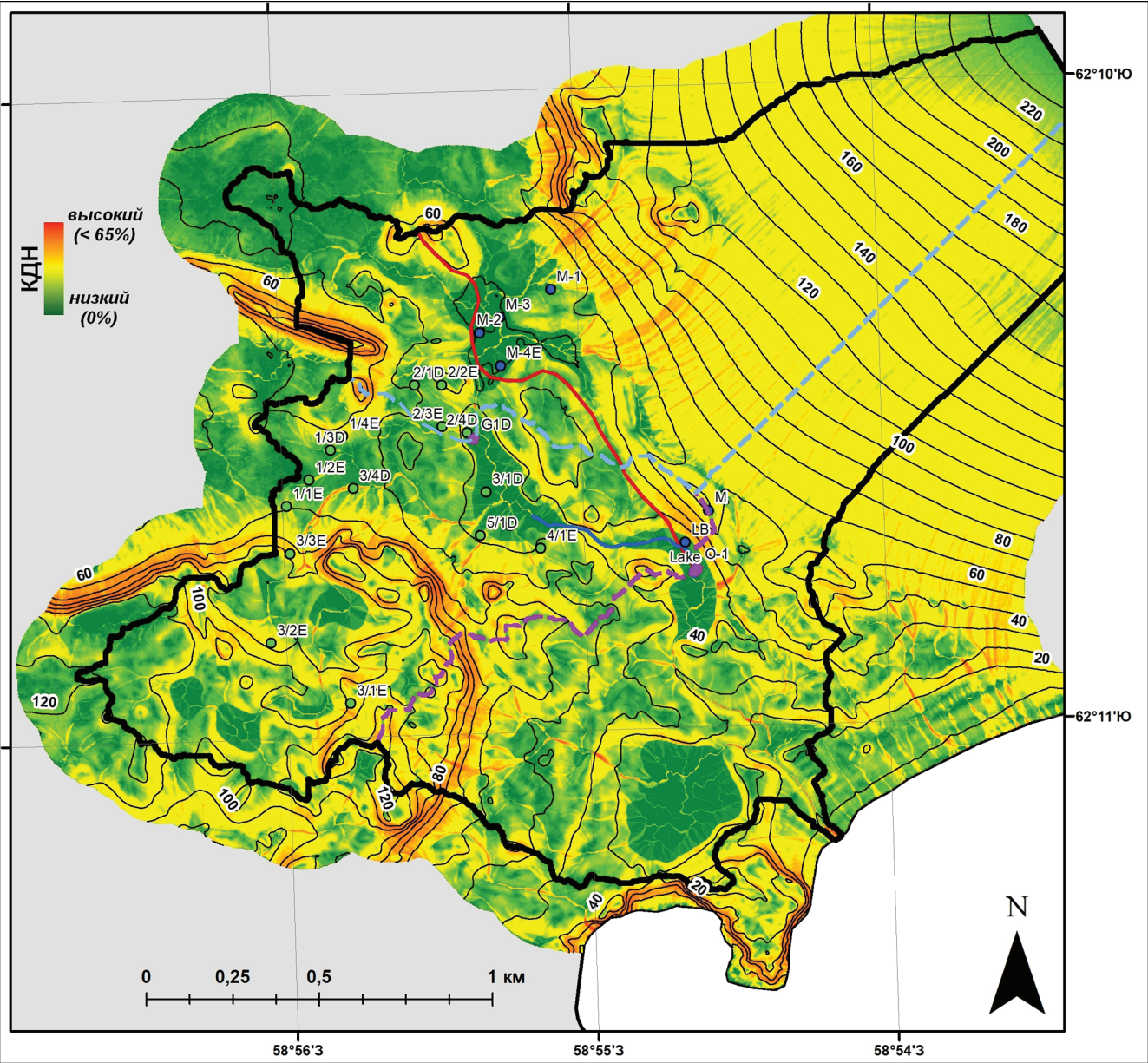


Рис. 3. Карта коэффициента доставки наносов для водосбора руч. Корабельного. Границы исследованного водосбора, подводосборов, точки отбора проб, изогипсы показаны так же, как на рис. 1

Fig. 3. Map of the sediment delivery ratio based for the Korabelny Stream catchment. Boundaries of the studied catchment; sub-catchments, contours are shown as on Fig. 1

Таблица 2

Оценка долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора на участке впадения стока с восточной части водосбора в озеро Месяц

Часть водосбора ручья	Площадь, км ²	Индекс связности потоков наносов (IC)	SDR ¹ , %	Доля наносов по IC, %	Доля наносов по методу ППП ² , % ± %
Приледниковая область	1,165/0,315 ³	−1,36/−1,78	22/18	96/88	81 ± 23/57 ± 28
Внеледниковая область	0,291	−2	15	4/12	19 ± 23/43 ± 28

Примечания. ¹ SDR – коэффициент доставки наносов. ² Числитель – для набора трассеров с некоторыми неконсервативными элементами; знаменатель – для набора трассеров только с консервативными элементами. ³ В остальных случаях: числитель – с учетом площади ледника; знаменатель – без площади ледника.

Несколько иное соотношение долевого вклада приледниковой и внеледниковой частей водосбора на основе метода ППП выявлено в целом для исследуемого водосбора (замыкающий створ – озеро Приледниковое). Результаты, полученные на основе метода ППП для двух смешанных образцов,

отобранных на участке впадения в озеро Приледниковое, руч. Корабельного и поверхностного слоя керна донных наносов озера, достаточно близки (табл. 3). При этом доля наносов, поступающих с приморской равнины и Центрального массива, составляет 34–40%.

Таблица 3

Оценка долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора руч. Корабельный

Часть водосбора ручья	Площадь, км ²	Индекс связности потоков наносов (IC)	SDR ¹ , %	Доля наносов по IC, %	Доля наносов по методу ППП, % ± %	Доля наносов по методу ППП, % ± % (донные наносы озера)
Приледниковая область	1,2/0,35 ²	–1,35/–1,72	22/19	84/60	60 ± 10	66 ± 10
Внеледниковая область	1,35	–1,79	17	16/40	40 ± 10	34 ± 10

Примечания. ¹ SDR – коэффициент доставки наносов. ² В остальных случаях: числитель – с учетом площади ледника; знаменатель – без площади ледника.

Обратное соотношение вклада двух основных частей водосбора в сток наносов получено в данном случае при использовании индекса связности потоков наносов, так как в этом случае оценка базируется на морфологии склонов и соотношении площадей водосбора, относящихся к приледниковой и внеледниковой частям водосбора. Фактически в этом случае не учитываются два ключевых фактора, влияющие на отрыв и транспорт частиц почвы или поверхностных отложений. Во-первых, не учитывается, что моренные отложения легче размываются плоскостным и ручейковым стоком, т. к. они не защищены никакой растительностью. Во-вторых, таяние собственно ледника ведет к поддержанию высоких расходов воды круглосуточно, т. к. внутрисуточные колебания температуры воздуха не оказывают никакого влияния на таяние ледника. В совокупности эти факторы способствуют перемещению значительно большего потока наносов с приледниковой части водосбора, даже учитывая переотложение части продуктов размыва в формирующихся вдоль края ледника временных водоемах.

Полученные оценки соотношения долевого вклада приледниковой и внеледниковой частей водосбора в сток наносов руч. Корабельного во многом отражают условия формирования стока воды и наносов в период сезона абляции 2014–2015 гг. Но есть и общие закономерности формирования стока наносов в пределах водосбора ручья Корабельного. В первую очередь следует отметить уникальность данного водосбора, а именно то обстоятельство,

что приморская равнина и Центральный массив, составляющие его внеледниковую часть, в целом характеризуются преобладанием вогнутых склонов. Склоны опираются на достаточно широкие ложбинные понижения, по днищам которых идет сток, а уклоны днищ снижаются вниз по течению. В пределах Центрального массива присутствуют озерные котловины, в которых накапливается вода, и только при их переполнении сток направляется далее в сторону приморской равнины. Центральная часть приморской равнины, куда поступает сток воды и наносов с Центрального массива и склонов самой приморской равнины, характеризуется достаточно плоским рельефом (см. рис. 2Б). В итоге характер расчленения рельефа способствует достаточно низкой связности потоков наносов во внеледниковой части водосбора (см. табл. 3).

Другим фактором, существенно влияющим на формирование стока наносов во внеледниковой части водосбора, являются промерзание почв и их малая мощность. В результате в процессе таяния снега, которое идет достаточно медленно до момента появления проталин, потоки с проталин фильтруются сквозь снег, продолжительное время сохраняющийся в днищах ложбин. Плоскостной и фрагментарно ручейковый смыл на склонах формируется в этой части водосбора только при интенсивном таянии снежного покрова. И только в днищах ложбин за счет выклинивания внутрипочвенного стока формируются поверхностные водотоки, которые способны транспортировать ограниченные объемы наносов.

Формирование стока наносов в пределах приледниковой части водосбора принципиально иное. На начальном этапе снеготаяния происходит формирование ряда мелких временных водоемов, расположенных по периферии современного края ледника. Вода в эти водоемы поступает как с поверхности ледникового купола, так и с отгороженной от остальной части водосбора валом краевой морены приледниковой части водосбора. При переполнении временных водоемов происходит паводковый сброс стока по направлению к озеру Месяц. В свою очередь, при переполнении озера Месяц за счет стока как с приледниковой, так и с внеледниковой части водосбора вода сбрасывается по руслу руч. Корабельного к озеру Приледниковому и далее к морю. При полном таянии снега поверхность морены с ледяным ядром обнажается, и моренные отложения по льду сползают к истокам руч. Корабельного. Наносы частично переоткладываются в приледниковых водоемах, а частично выносятся в озеро Месяц.

По данным [Chinagro, 2014] сток воды с ледника в целом составляет не менее 80% суммарного стока, поступающего в руч. Корабельный. Наши наблюдения показывают, что в начале сезона абляции сток с ледниковой и приледниковой частей водосбора примерно одинаков, а в конце лета сток с приледниковой части территории достигает 80–90%. До появления проталин на приледниковой части водосбора наносы формируются только за счет размыва русла ручья на участке между озерами Месяц и Приледниковое. С появлением проталин и последующим сходом снега активизируются процессы быстрой солифлюкции по бортам моренных холмов.

Сезон абляции 2014–2015 гг. характеризовался повышенными запасами снега на ледниковом куполе. Поэтому таяние льда не повлияло на формирование стока воды и наносов.

Для полуострова Файлдс осадки со слоем свыше 10 мм в сутки в период абляции сравнительно редки, их число составляет от одного до четырех

в месяц. Причем часто это дождь со снегом. Собственно, сезон абляции 2014–2015 гг. не отличался от остальных лет по числу таких осадков, но поздний сход снежного покрова снизил величину стока наносов в период отбора проб.

Резюмируя, можно отметить, что условия формирования стока наносов на водосборе руч. Корабельного в сезон абляции 2014–2015 гг. отличались от среднемноголетних. Сток воды с ледникового купола был невелик, т. к. таял только снег, а у него довольно высокое альбедо по сравнению со льдом. Обычно расходы воды в сезон абляции резко возрастают при активном таянии льда. Поэтому полученные на основании применения метода ППП соотношения между вкладом приледниковой и внеледниковой частей водосбора в сток наносов руч. Корабельного несколько завышены в пользу вклада внеледниковой части водосбора.

Гранулометрический состав почв и наносов, переотложенных в днищах ложбинных понижений на приморской равнине, в среднем практически идентичен (табл. 4). Это говорит о том, что в процессе транспортировки наносов не происходит их разделения на взвешенные и влекомые. То есть временные водотоки имеют небольшую глубину и незначительную турбулентность. В противном случае в составе отложившихся наносов наблюдался бы рост доли песка.

Совершенно иная картина характерна для приледниковой части водосбора, где донные наносы в основном состоят из песка, тогда как в моренных отложениях доминирует алевролит (см. табл. 4). Песок перемещается в придонном слое и откладывается на участках падения скоростей в мелководных водоемах, тогда как более легкие частицы переносятся потоком за их пределы. Таким образом, временные водотоки, формирующиеся в ложбинных понижениях в пределах приморской равнины, обладают невысокой транспортирующей способностью и низкой турбулентностью в отличие от временных потоков в приледниковой части водосбора.

Таблица 4

Гранулометрический состав почв, морены и наносов, отобранных в различных частях водосбора руч. Корабельный

Место отбора	Число проб ¹	2000–50 мкм, %	50–2 мкм, %	<2 мкм, %
Почва, приморская равнина	9	24,8	67,4	7,8
Донные наносы, приморская равнина	7	25,5	66,1	8,4
Морена, приледниковая часть водосбора	6	18,5	73	8,5
Донные наносы водоема у ледника, стрежень потока	11	84,7	13,7	1,6
Донные наносы водоема у ледника, периферия	11	75,5	22	2,5
Донные наносы, Приледниковое озеро	19	77,6	20,3	2,5

Примечание. ¹ Использовались в том числе послойные пробы донных отложений, отобранных в водоеме у ледника (22 пробы) и в Приледниковом озере.

ВЫВОДЫ

Основной сток наносов на водосборе руч. Корабельного формируется с момента появления проталин в период сезона абляции, которой начинается с декабря и завершается в конце марта – апреле. Данные наблюдений за особенностями накопления и схода снега и температурным режимом воздуха в период сезона абляции позволяют утверждать, что сезон 2014–2015 гг. отличался от предшествующих и последующих аномально поздним сходом снега на ледниковом куполе Беллинсгаузен и прилегающих территориях.

Совместное использование метода ППП, расчетов индекса связности потока наносов и коэффициента доставки наносов в сочетании с анализом различий в проективном покрытии почв (ПРПП) растительностью различных участков позволило количественно оценить долевого вклад наносов, поступающих в руч. Корабельный с двух основных частей водосбора: приледниковой, сложенной с поверхности моренными отложениями, и с внеледниковой части водосбора, представленной приморской равниной и возвышающимся над ней на 70–80 м Центральным массивом.

Установлено, что, несмотря на различия в рельефе этих двух частей водосбора, сказывающихся на особенностях формирования стока воды, средние по площади индексы связности потоков наносов у них сравнительно близки и составляют –1,79 и –1,35 для внеледниковой и приледниковой частей соответственно. Причина схожести связана с наличием ловушек наносов в виде временных водоемов в пределах приледниковой части водосбора, озерных котловин на Центральном массиве и плоской депрессии в центральной части приморской равнины. При этом моренные отложения приледниковой части водосбора не защищены от смыва и размыва растительным покровом.

В пределах приморской равнины и Центрального массива ППП растительностью варьирует от 0 до 20% в нижних частях склонов и от 0 до 80% на их приводораздельных частях и на большей части плоской депрессии приморской равнины. Это, а также наличие ледяной корки в начальный период снеготаяния и просачивание воды в грунт после появления проталин, способствует существенному снижению смыва и только фрагментарному размыву почв во внеледниковой части водосбора ручья. Значимыми факторами, обеспечивающими большой поток наносов, формирующийся в пределах приледниковой части водосбора, являются более высокие расходы воды за счет активного таяния снега и льда на ледниковом куполе, наличие сети эрозионных врезов на освободившемся ото льда бывшем подножье ледяного купола и наличие ледяного ядра в краевой морене, препятствующего фильтрации талой воды.

Результаты оценок долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора руч. Корабельного на основе использования метода ППП получены отдельно для восточной половины водосбора и всего водосбора ручья. В первом случае они составили 19 и 81% соответственно. В целом для водосбора руч. Корабельного соотношение долевого вклада внеледниковой и приледниковой частей водосбора в сток наносов ручья оценено в 34–40 и 60–66% соответственно. Преобладание вклада наносов, поступающих с приледниковой части водосбора, представляется вполне логичным. Но оно несколько ниже оценок ранее установленного соотношения долевого вклада стока воды, поступающего с двух основных частей водосбора [Chinarro, 2014]. Это связано с тем, что сезон абляции 2014–2015 гг., когда проводился отбор проб, характеризовался поздним сходом снега по сравнению со среднемноголетними значениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов Е.В., Андреев М.П. Температурный режим гумусовых почв острова Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Вестник СПбГУ. Сер. 3. 2011. Вып. 2. С. 129–133.
- Beel C.R., Lamoureux S.F., Orwin J.F. Fluvial response to a period of hydrometeorological change and landscape disturbance in the Canadian High Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, p. 10446–10455, DOI: 10.1029/2018GL079660.
- Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment, *Catena*, 2008, vol. 75, p. 268–277, DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
- Braun M., Simões J.C., Vogt S. et al. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook, *Antarctic Science*, 2001, vol. 13, no. 1, p. 41–52.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F. et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Chinarro D. *System Engineering Applied to Fuenmayor Karst Aquifer (San Julián de Banzo, Huesca) and Colins Glacier (King George Island, Antarctica)*, Doctoral Thesis accepted by the University of Zaragoza, Spain, 2014, XX, 161 p.
- Collins A., Walling D.E., Leeks G.J.L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: a case study of the Exe and Severn River basins, United Kingdom, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1996, no. 2, p. 41–53.
- Coulthard T.J., Van De Wiel M. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use

- changes, *Geomorphology*, 2017, vol. 277, p. 265–281, DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.05.027.
- Gaspar L., Quijano, L., Lizaga, I. et al. Effects of land use on soil organic and inorganic C and N at ^{137}Cs traced erosional and depositional sites in mountain agroecosystems, *Catena*, 2019, vol. 181, DOI: 10.1016/j.catena.2019.05.004.
- Haddadchi A., Ryder D.S., Evrard O. et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models, *Int. J. Sediment Res.*, 2013, vol. 28, p. 560–578.
- Hodgkins R., Cooper R., Wadham J. et al. Suspended sediment fluxes in a high-Arctic glacierised catchment: implications for fluvial sediment storage, *Sediment Geol.*, 2003, vol. 162, p. 105–117.
- Hodson A., Gurnell A., Tranter M. et al. Suspended sediment yield and transfer processes in a small high-artic glacier basin, Svalbard, *Hydrol. Process.*, 1998, vol. 12, p. 73–86.
- Howat I., Porter C., Noh M.-J. et al. The Reference Elevation Model of Antarctica – Mosaics, Version 2, 2022, DOI: 10.7910/DVN/EBW8UC, Harvard Dataverse, V1.
- Kavan J., Ondruch J., Nývlt D. et al. Seasonal hydrological and suspended sediment transport dynamics in proglacial streams, James Ross Island, Antarctica, *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 2017, vol. 99, no. 1, p. 38–55, DOI: 10.1080/04353676.2016.1257914.
- Koiter A.J., Owens P.N., Petticrew E.L. et al. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins, *Earth Sci. Rev.*, 2013, vol. 125, p. 24–42.
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L. et al. FingerPro: an R package for tracking the provenance of sediment, *Water Resources Management*, 2020, vol. 34, no. 12, p. 3879–3894.
- Mokhov I.I., Parfenova M.R. Relationship of the extent of Antarctic and Arctic ice with temperature changes, 1979–2020, *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 496, no. 1, p. 66–71.
- Navas A., Machín J. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragón (northeast Spain): Controlling factors and environmental implications, *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, p. 961–973.
- Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L. et al. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications, *Earth Sci. Rev.*, 2016, vol. 162, p. 1–23, DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.012.
- Rosa K.K., Vieira R., Borges G. et al. Meltwater drainage and sediment transport in a small glacierized basin, Wanda glacier, King George Island, Antarctica, *Geociências*, 2014, vol. 33, p. 181–191.
- Smellie J.L., Pankhurst R., Thomson M. et al. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, Geochemistry and Evolution, *Br. Antarct. Surv. Sci. Rep.*, 1984, no. 87, 85 p.
- Syvitski J.P.M. Sediment discharge variability in Arctic rivers: implications for a warmer future, *Polar Research*, 2002, vol. 21, no. 2, p. 323–330, DOI: 10.3402/polar.v21i2.6494.
- Turner J., Marshall G.J., Clem K. et al. Antarctic temperature variability and change from station data, *International Journal of Climatology*, 2019, vol. 40, p. 2986–3007, DOI: 10.1002/joc.6378.

Поступила в редакцию 15.06.2023

После доработки 10.03.2024

Принята к публикации 24.04.2024

SEDIMENT RUNOFF FORMATION IN A SMALL PERIGLACIAL CATCHMENT ON THE KING GEORGE (VATERLOO) ISLAND, ANTARCTICA

V.N. Golosov¹, B.R. Mavlyudov², S.V. Kharchenko³, A. Navas⁴, L. Gaspar⁵, I. Lizaga⁶, A. Castillo⁷

^{1,3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

^{1–3} Institute of Geography, Russian Academy of Sciences

^{4,5} Spanish National Research Council, Zaragoza, 50059, Spain

⁶ Ghent University, 9000, Ghent, Belgium

⁷ University of Southern Chile, Las Encinas, 220, Valdivia, Chile

¹ Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Leading Scientific Researcher,
D.Sc. in Geography; e-mail: golosov@gmail.com

² Glaciology Department, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: bulatrm@bk.ru

³ Department of Geomorphology and Paleogeography, Leading Scientific Researcher,
Ph.D. in Geography; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

⁴ Aula Dei Experimental Station, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: anavas@eead.csic.es

⁵ Aula Dei Experimental Station, Post-doctoral researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: lgaspar@eead.csic.es

⁶ Department of Green Chemistry and Technology, Post-doctoral researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: Ivan.Lizaga@UGent.be

⁷ Institute of Chemical Sciences, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: acastill@uach.cl

Global climate change has most significantly affected the Polar Regions. The increase in air temperature has stimulated the melting of glaciers in the Arctic and Antarctic, which has contributed to changes in the formation of water and sediment runoff. However, there are very few quantitative estimates of the sediment redistribution in the periglacial catchments of the Polar Regions. Specific features of water and sediment runoff were studied within the catchment area of the Korabelnyj Stream located on the Fildes Peninsula in Antarctica near the Bellingshausen Ice Dome. The main aim of the study was to investigate the conditions for the formation of water and sediment runoff and to identify the proportional contribution of washout and erosion material coming from the periglacial and maritime parts of the catchment area to the sediment runoff of the stream. A set of methods and approaches, including: a) estimates of the sediment flow connectivity index; b) fingerprinting technique; c) hydrometeorological observations; d) large-scale geomorphological survey and others, was applied to identify the conditions for the formation of surface runoff and washout, the mechanisms of sediment redistribution in various parts of the fluvial network and to quantify the proportional contribution of two main sediment sources to the sediment runoff of the stream. A fraction with a particle size of $\leq 63 \mu\text{m}$ was used for geochemical and spectrometric analyzes of soils and sediments. In total, the content of 34 elements was analyzed, i.e. 6 radioisotopes and 28 stable elements. It has been established that despite the significant differences in the relief of the near-glacial and maritime parts of the catchment area, the indices of sediment connectivity are quite close and amount to $-1,79$ and $-1,35$, respectively. A significant part of the material transported by temporary streams from the slopes of the catchment area is redeposited in relief depressions partially occupied by water bodies. The main volume of sediments, which is at least 60–66% of the total sediment runoff in the outlet section of the Korabelnyj Stream, comes from the periglacial part of the catchment area. This is due to the increased water discharge relative to the non-glacial part of the catchment area, which results from the melting of snow and ice accumulated on the ice dome, the high erosion of moraine deposits unprotected by vegetation, and the presence of an ice core in moraines, which prevents water filtration.

Keywords: global climate change, sediment redistribution, erosion, sedimentation, moraine

REFERENCES

- Abakumov E.V., Andreyev M.P. Temperaturnyj rezhim gumusovykh pochv ostrova King-Dzhorszh, Zapadnaya Antarktika [The temperature regime of humus horizons of soils of King George Island, Western Antarctica], *Vestn. Sankt-Peterburg. un-ta, Ser. 3*, 2011, no. 2, p. 129–133. (In Russian)
- Beel C.R., Lamoureux S.F., Orwin J.F. Fluvial response to a period of hydrometeorological change and landscape disturbance in the Canadian High Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, p. 10446–10455, DOI: 10.1029/2018GL079660.
- Borselli L., Cassi P., Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment, *CATENA*, 2008, vol. 75, p. 268–277, DOI: 10.1016/j.catena.2008.07.006.
- Braun M., Simões J.C., Vogt S. et al. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook, *Antarctic Science*, 2001, vol. 13, no. 1, p. 41–52.
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F., Marchi L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments, *Geomorphology*, 2013, vol. 188, p. 31–41, DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.05.007.
- Chinarro D. *System Engineering Applied to Fuenmayor Karst Aquifer (San Julián de Banzo, Huesca) and Colins Glacier (King George Island, Antarctica)*, Doctoral Thesis accepted by the University of Zaragoza, Spain, 2014, XX, 161 p.
- Collins A., Walling D.E., Leeks G.J.L. Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: a case study of the Exe and Severn River basins, United Kingdom, *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 1996, no. 2, p. 41–53.
- Coulthard T.J., Van De Wiel M. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes, *Geomorphology*, 2017, vol. 277, p. 265–281, DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.05.027.
- Gaspar L., Quijano L., Lizaga I., Navas A. Effects of land use on soil organic and inorganic C and N at ^{137}Cs traced erosional and depositional sites in mountain agroecosystems, *Catena*, 2019, vol. 181, 104058, DOI: 10.1016/j.catena.2019.05.004.
- Haddadchi A., Ryder D.S., Evrard O. et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models, *Int. J. Sediment Res.*, 2013, vol. 28, p. 560–578.
- Hodgkins R., Cooper R., Wadham J. et al. Suspended sediment fluxes in a high-Arctic glacierised catchment: implications for fluvial sediment storage, *Sediment Geol.*, 2003, vol. 162, p. 105–117.
- Hodson A., Gurnell A., Tranter M. et al. Suspended sediment yield and transfer processes in a small high-artic glacier basin, Svalbard, *Hydrol Process*, 1998, vol. 12, p. 73–86.
- Howat I., Porter C., Noh M.-J. et al. *The Reference Elevation Model of Antarctica – Mosaics, Version 2*, 2022, DOI: 10.7910/DVN/EBW8UC, Harvard Dataverse, V1.
- Kavan J., Ondruch J., Nývlt D. et al. Seasonal hydrological and suspended sediment transport dynamics in proglacial streams, James Ross Island, Antarctica, *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 2017, vol. 99, no. 1, p. 38–55, DOI: 10.1080/04353676.2016.1257914.
- Koiter A.J., Owens P.N., Peticrew E.L. et al. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins, *Earth Sci. Rev.*, 2013, vol. 125, p. 24–42.
- Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R package for tracking the provenance of sediment, *Water Resources Management*, 2020, vol. 34, no. 12, p. 3879–3894.
- Mokhov I.I., Parfenova M.R. Relationship of the extent of Antarctic and Arctic ice with temperature changes, 1979–2020, *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 496, no. 1, p. 66–71.

- Navas A., Machín J. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragón (northeast Spain): Controlling factors and environmental implications, *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, p. 961–973.
- Owens P.N., Blake W.H., Gaspar L. et al. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications, *Earth Sci. Rev.*, 2016, vol. 162, p. 1–23, DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.012.
- Rosa K.K., Vieira R., Borges G. et al. Meltwater drainage and sediment transport in a small glacialized basin, Wanda glacier, King George Island, Antarctica, *Geociências*, 2014, vol. 33, p. 181–191.
- Smellie J.L., Pankhurst R., Thomson M. et al. *The geology of the South Shetland Islands*: VI. Stratigraphy, Geochemistry and Evolution. Br. Antarct. Surv. Sci. Rep., 1984, no. 87, 85 p.
- Syvitski J.P.M. Sediment discharge variability in Arctic rivers: Implications for a warmer future, *Polar Research*, 2002, vol. 21, no. 2, p. 323–330. DOI: 10.3402/polar.v21i2.6494.
- Turner J., Marshall G.J., Clem K. et al. Antarctic temperature variability and change from station data, *International Journal of Climatology*, 2019, vol. 40, p. 2986–3007, DOI: 10.1002/joc.6378.

Received 15.06.2023

Revised 10.03.2024

Accepted 24.04.2024