

МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 556.3.04:556.34

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.275

ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ
ФОРМИРОВАНИЯ
ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ
ВОДОПРОВОДЯЩИХ ПУТЕЙ НА
СКЛОНАХ ДОЛИН МАЛЫХ
ГОРНЫХ РЕК

PROPERTIES OF PREFERENTIAL
WATER FLOW PATHS
NETWORKS AND BACKGROUND
FOR THEIR GENESIS IN THE
SLOPES OF SMALL MOUNTAIN
VALLEYS

В.В. Шамов¹, Е.А. Шекман¹, Т.С. Губарева^{2,1},
Б.И. Гарцман^{2,1}, С.Ю. Лупаков¹,
Г.А. Челноков³, Н.К. Кожевникова⁴,
М.Л. Бурдуковский⁴, А.В. Орляковский⁵

Vladimir V. Shamov¹, Evgeniy A. Shekman¹,
Tatiana S. Gubareva^{2,1}, Boris I. Gartsman^{2,1},
Sergei Yu. Lupakov¹, Georgiy A. Chelnokov³,
Nadezhda K. Kozhevnikova⁴,
Maksim L. Burdukovskii⁴,
Aleksandr V. Orlyakovskiy⁵

¹Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
г. Владивосток, Россия; ²Институт водных
проблем РАН, г. Москва, Россия; ³Геологический
институт РАН, г. Москва, Россия;

¹Pacific Geographical Institute of FEB RAS,
Vladivostok, Russia;

²Water Problems Institute RAS, Moscow, Russia;

³Geological Institute RAS, Moscow, Russia;

⁴Федеральный научный центр биоразнообразия
наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН,
г. Владивосток, Россия; ⁵Дальневосточный
федеральный университет, г. Владивосток,
Россия.

⁴Federal Scientific Center for East Asia Terrestrial
Biodiversity FEB RAS, Vladivostok, Russia;

⁵Far Eastern Federal University, Vladivostok,
Russia.

vlshamov@yandex.ru

vlshamov@yandex.ru

Аннотация. Дан анализ проведенных в горных речных долинах южного Сихотэ-Алиня и Верхнеколымского нагорья систематических исследований крупных предпочтительных водопроводящих путей – залегающих на глубине до 1 м от поверхности подземных дрен склонового масштаба, в которых концентрируется основная часть склоновых вод. Приведены оценки стока и скорости движения воды в этих дренах – соответственно 0,041–7,36 л/с и 0,1–7,2 см/с, которые по величине близки к таковым в руслах рек первого порядка в периоды межени. Выявлена их приуроченность к реликтовым или активным каменным потокам. Выдвинута гипотеза, что

Abstract. For the case of small valleys in South Sikhote-Alin Ridge and Verkhnekolymskoye Highlands (Pacific Russia, Northeast Asia), there is given an analysis of systematic observations of big preferential flow paths of slope-scale, – subsurface shallow (not deeper than 1 m) watercourses, in which the most water migrates fast. The watercourses occur most often within the bodies of relic or active stony stripes ("block streams"). In some of the studied watercourses, there were estimated discharges (0.041–7.36 l/s) and velocities (0.1–7.2 cm/s) that are quite comparable to the 1-order streamflow rates when low water periods. We suggest the biggest among such subsurface watercourses are to be controlled by geological structures of slope scale,

наиболее крупные дрены масштаба склона могут определяться структурно-геологическими условиями, а именно разрывными нарушениями сублокального масштаба, оперяющими локальные разломы. На основе характера движения воды в дренах, с учетом результатов предшествующих исследований других авторов, предложен вариант их типизации, включающий три основные структурные группы: 1) главные проводники, имеющие длину порядка сотен и первых тысяч метров и ширину несколько метров; 2) домены фильтрационного потока длиной от 0,1 до первых десятков метров и шириной до 10 см, 3) пути матричного потока, характеризующиеся длиной намного менее 10 см и поперечными размерами менее 0,1 см. Детальное изучение строения склонового чехла и динамики склоновых водотоков позволит обосновать гипотезу о значительной роли малых разломов и связанных с ними активных или реликтовых каменных потоков в концентрации склонового стока. Это позволит глубже понять механизмы формирования паводков в реках, особенно в районах с резкими внутрисезонными колебаниями увлажнения, такими как районы Азии вблизи Тихоокеанского побережья.

Ключевые слова: малый горный водосбор; склоновый сток; каменный поток; курум; предпочтительные водопроводящие пути; разрывное нарушение; Дальний Восток России.

Введение

Процессы генезиса стока воды, механизмы взаимодействия грунтовых склоновых и русловых вод остаются ключевой проблемой гидрологии и гидрогеологии, несмотря на обилие данных стандартных наблюдений, результатов специальных исследований на экспериментальных и репрезентативных водосборах, а также научных публикаций в этой области.

В горных ландшафтах в зоне избыточного увлажнения благодаря задернованности и высокой водопроницаемости склонов

namely sub-local fractures, which feather local fractures. Accounting for the results of relevant investigations by other authors and the water movement features revealed in the studied subsurface watercourses, we offer a variant of their division onto three main structural groups: 1) the main paths (conduits) with a length of hundreds to 1–2 thousand meters and width of several meters; 2) the filtration flow domains with a length of 0.1 meters to several dozen meters and width of up to 0.1 meters; and 3) the matrix flow paths with a length of much less 10 centimeters and width of less 0.1 centimeters. Detailed studies for talus texture and water regime of the hillside watercourses would make it possible to prove a hypothesis on the significant role of small faults (fractures) and related to them the active or relic block streams in the concentration of slope flow. It could allow a deeper understanding of the flood generation in river basins, especially in the areas where severe intra-annual moistening fluctuations as Pacific Asia.

Keywords: small mountain catchment, slope flow, block stream; kurum; preferential flow paths, fault, Far East of Russia (Pacific Russia).

поверхностные временные водотоки на склонах образуются крайне редко [Гарцман, Лыло, Черненко, 1971; Жильцов, 2008; Шепелев, 2011; Глотова, Глотов, 2012]. Атмосферная вода, как правило, быстро проникает в толщу склоновых отложений и далее стекает в виде более или менее концентрированных подповерхностных водных потоков. Эти потоки обозначаются в литературе различными терминами: «быстрый грунтовый сток» [Виноградов, 1967], «контактный сток», «дренажно-пластовый сток» [Бефани и др., 1966], «подповерхностный (приповерхностный) сток» [Кулаков, 1973], «сток по макропорам» [Pierce, Stewart, Sklash, 1986], «сток по трюбкам»

Shamov V.V., Shekman E.A. Gubareva T.S., Gartsman B.I., Lupakov S.Yu., Chelnokov G.A., Kozhevnikova N.K., Burdukovskii M.L., Orlyakovskiy A.V. Properties of preferential water flow paths networks and background for their genesis in the slopes of small mountain valleys. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2021, vol. 3, iss. 3, pp. 275–296 (In Russian; abstract in English).

(pipeflow) [Uchida, van Meerveld, McDonnel, 2005], «сток по подповерхностным временным руслам» [Василенко, 2013], «быстрый подповерхностный дождевой сток» (rapid subsurface storm flow) [Uhlenbrook, 2006], «дрены – подповерхностные потоки» [Тарбеева, Гарцман, 2017]. Эти формы склонового стока в настоящее время остаются слабо изученными [Brutsaert, 2006; Гарцман и др., 2020] и, очевидно в связи с этим, обычно не рассматриваются в рамках теории стокоформирования. Нет также ясности в понимании условий и причин концентрации стока на склонах. Вместе с тем, изучение механизмов концентрации склонового стока согласуется с современной концепцией предпочтительных водопроводящих путей (preferential flow paths) в речных бассейнах, а их недоучет может приводить к ошибкам в расчетах и прогнозах экстремальных характеристик паводков, основанных на популярных моделях стока [Brutsaert, 2006; Uhlenbrook, 2006; Gerke, German, Niebel, 2010; Василенко, 2013; Weiler, 2017]. За счет образования подповерхностных потоков осуществляется быстрый сброс склоновых вод в реки, тем самым способствуя формированию экстремальных паводков на горных реках, особенно в области распространения внетропического летнего муссона. Данный факт подтверждается установленным возрастанием доли подповерхностных склоновых вод в дождевом паводковом стоке низкопорядковых притоков реки Правая Соколовка [Губарева и др., 2016; Губарева и др., 2019], а также два пика в дождевых паводках, вызванных одним дождем [Гарцман, Шамов, 2015].

Характеристика обследованных в период с 2015 по 2017 год сравнительно устойчивых подповерхностных водных потоков на склонах горных речных долин и анализ геолого-геоморфологических условий формирования этих потоков представляют собой предмет данной статьи.

Объекты, методы и результаты исследований

В пределах бассейнов рек Правая Соколовка и Падь Васькова (Южный Сихотэ-

Алинь, соответственно Чугуевский и Дальнегорский районы Приморского края), а также в бассейне ручья Контактный (верховья реки Колымы, Тенькинский район Магаданской области) в период с 2015 по 2017 год авторами были обследованы склоны речных долин, сложенные с поверхности относительно узкими (метры – первые десятки метров) полосами грубообломочных отложений, нисходящими вдоль склона. На юге Дальнего Востока эти полосы часто, особенно в нижних частях склонов, задернованы и покрыты плотной древесной и кустарниковой растительностью, на севере выполняющие их глыбы при низкой скорости их сползания по склону могут быть покрыты только лишайниками. В некоторых из этих образований при закладке шурфов на глубине 70–100 см наблюдалось свободное или практически свободное течение воды. Некоторые из шурфов были использованы в качестве контрольных створов для выполнения серии измерений динамических характеристик склоновых водных потоков. Районы работ, обозначенные на схеме (рисунок 1), объединяет их приуроченность к областям мезозойской складчатости.

Согласно схеме тектонического районирования Приморского края, бассейн реки Правая Соколовка находится в пределах Самаркинской подзоны Центральной структурно-формационной зоны Сихотэ-Алинской геосинклинальной складчатой системы [Назаренко, Бажанов, 1989] или Самаркинского террейна [Ханчук и др., 1995]. Наиболее молодые отложения района распространены в левобережье реки Правая Соколовка и представлены позднемеловыми эффузивами кислого состава (туфами, туфопесчаниками, игнимбритами, риолитами). Мощность этих образований достигает 600–650 м. Верхняя трещиноватая зона, обусловленная процессами выветривания, прослеживается до глубины 30 м в долинах и более – на водоразделах. Глубже трещиноватость связана с разломами. Правый борт долины реки характеризуется преимущественно более древними осадочными породами юры и триаса (песчаники, алевролиты с обломками и глыбами известняков, кремней) [Триас..., 2004].

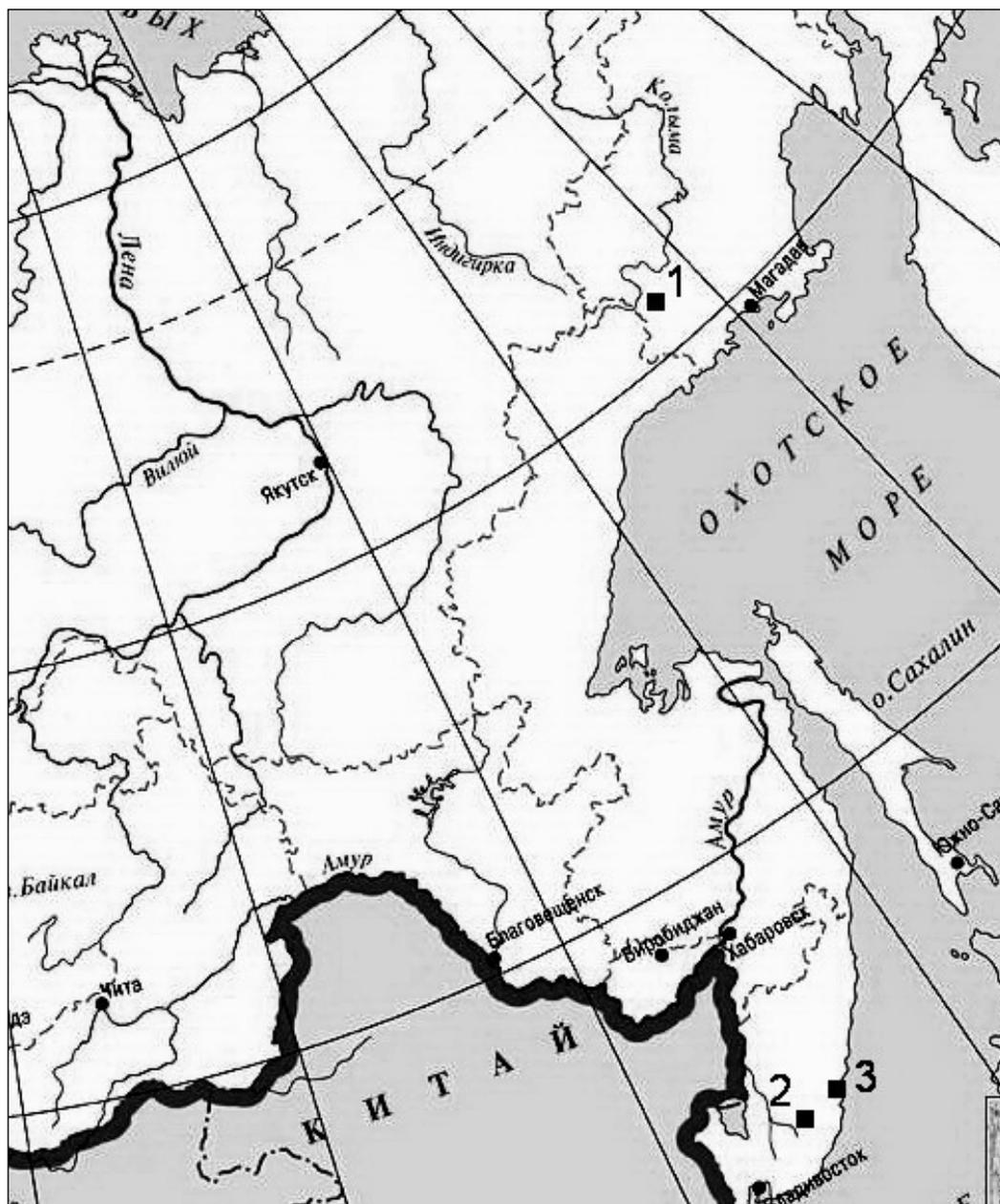


Рисунок 1. Расположение районов исследований. Обозначения: 1 – ручей Контактный, 2 – река Правая Соколовка, 3 – река Падь Васькова.

Figure 1. A layout of the observations sites location: 1 – Kontaknovyi Creek, 2 – Pravaya Sokolovka River, 3 – Pad Vas'kova River.

Эффузивные породы основного состава имеют локальное распространение. В гидрогеологическом отношении – это Сихотэ-Алинский гидрогеологический массив, характеризующийся широким распространением трещинных и трещинно-жильных подземных вод. Более подробная ландшафтная характеристика данной территории приводится в [Болдескул и др., 2014].

Бассейн реки Падь Васькова причленяется к устьевому району реки Рудная. Он расположен в пределах одной из крупных структурно-фациальных зон – Прибрежном антиклинории или Таухинском террейне [Ханчук и др., 1995]. Породы террейна представлены осадочными кремнисто-терригенными формациями каменноугольного, пермского и мезозойского возрастов, обнажения которых на современном уровне эрозионного среза занимают небольшую

площадь. Основная часть данной территории сложена эффузивами, интрузивами и вулканогенно-осадочными образованиями верхнего мела и палеогена. Эффузивы представлены комплексами пород среднего и кислого состава (кварцевые порфириды и риолиты, их лавы и туфы); интрузивные разности – гранитоидами палеогена, образующие крупные массивы среди пород эффузивного комплекса [Аржанова, Елпатьевский, 1990].

Мерзлотные ландшафты экспериментального бассейна ручья Контактный сформированы в основном верхнепермскими осадочными породами (глинистыми сланцами). На высоте 1 000 м над уровнем моря и выше здесь распространены каменные осыпи и россыпи интрузивных гранодиоритовых пород, мелкозернистый заполнитель в которых практически отсутствует, грубообломочный слой хорошо аэрируется, в связи с чем в некоторых местах глубина протаивания достигает 2,5 метров и более, при этом у подножий склонов лед обнаруживается под камнями вблизи дневной поверхности даже в конце лета [Алексеев и др., 2011; Михайлов, 2013].

В период с 2015 по 2017 год авторами выполнено более 70 определений дебитов некоторых из выявленных подповерхностных потоков на склонах [Гарцман и др., 2020]. Измерения проводились методом смешения индикатора или методом ионного паводка, применяемого обычно для случая валунно-каменистых открытых русел горных рек [Карасев, Шумков, 1985]. Применялся широко используемый искусственный трассер – раствор NaCl с заданной концентрацией, обычно равной 100 г/л. Непрерывная продолжительная – от 6 до 24 часов – регистрация минерализации воды в контрольном створе потока (шурфе) осуществлялась с помощью мультипараметрической системы контроля качества воды YSI Professional Plus. Временной шаг записи выбирался равным 5, 10 или 20 с в зависимости от водности потока и расстояния контрольного створа от места налива трассера, объем раствора в этой же зависимости варьировал от 0,5 до 2 л. В бассейне ручья Контактный в

подповерхностных потоках на вскрытых участках были измерены поплавковым методом только скорости течения воды.

Во избежание ошибок в расчетах для последующего анализа использовались те результаты экспериментов, в которых гидравлическая связь потока в месте налива раствора с потоком в контрольном створе была достоверно установлена.

Измеренные дебиты и скорости воды приведены в таблице. Величины дебитов изменялись в диапазоне 0,041–7,36 л/с при средних скоростях течения 0,1–7,2 см/с. Эти величины оказались сопоставимы с расходами и скоростями течения в прилегающих первичных поверхностных водотоках в состоянии межени. В экспериментальные объекты был включен регулярно пересыхающий ручей Сухой, который имеет площадь водосбора 0,37 км², морфологически выраженную долину и русло. Он представляет собой переходную форму от склонового подповерхностного потока к открытому водотоку, в связи с чем его динамические характеристики в ряду полученных данных ожидаемо максимальны.

Наиболее значительные и, очевидно, устойчивые в безморозный период подповерхностные потоки склоновых вод имеют постоянное положение и приурочены к линейным зонам концентрации склонового стока – естественным подземным каналам или дренам. Об устойчивости таких водных потоков может указывать обнаружение авторами в них особой уссурийских безлегочных тритонов (*Onychodactylus fischeri*) даже при длительном отсутствии дождей, учитывая, что эти земноводные не могут обитать вне воды.

Даже небольшой объем сведений, полученных авторами при обследовании десятка подземных дрен, обнаруживает их приуроченность к хорошо промытым вытянутым вдоль склонов крупнообломочным отложениям эффузивных пород, которые можно отнести к каменным потокам (курумам), описанным в литературе [Тюрин, Романовский, Полтев, 1982; Короткий, Никольская, Скрыльник, 1984; Говорушко, 1986; Шепелев, 2011].

Таблица. Динамические характеристики склоновых подповерхностных потоков по данным натурных измерений

Table. Water discharges and flow rates of the slope subsurface watercourses based on in-situ tracer measurements

Условное название потока	Даты измерений	Количество измерений	Дебит, л/с*	Скорость течения, м/с*
Бассейн реки Правая Соколовка, Южный Сихотэ-Алинь, Приморский край, Россия				
Ботаническая дрена	2016: 11.08, 04.09, 17.09, 19.09, 22.09, 24.09, 25.09, 26.09; 2017: 05.08, 09.08	10	<u>0,48</u> 0,148–1,19	<u>0,004</u> 0,002–0,008
Антропогенная дрена	2016: 05.08, 08.08 (2), 18.08, 28.08, 29.08, 30.08 (2), 31.08, 01.09, 03.09, 14.09, 18.09, 22.09; 2017: 07.07, 04.08, 08.08, 09.08	18	<u>1,19</u> 0,056–6,95	<u>0,010</u> 0,001–0,042
Жильцовская дрена	2015: 26.05; 2016: 07.08, 09.08, 11.08, 13.08, 16.08, 17.08, 18.08, 01.09, 15.09, 18.09, 21.09; 2017: 05.08, 06.08, 13.08	15	<u>1,24</u> 0,15–4,81	<u>0,018</u> 0,003–0,039
Дремучая дрена	2016: 05.08, 11.08, 15.08, 16.08, 19.08, 02.09, 03.09, 15.09, 20.09, 21.09; 2017: 04.08, 10.08	12	<u>0,23</u> 0,041–1,55	<u>0,007</u> 0,002–0,030
Бассейн реки Падь Васькова, Южный Сихотэ-Алинь, Приморский край, Россия				
Мармеладная дрена	2016: 05.07, 11.07 (2), 12.07	4	<u>0,82</u> 0,504–1,27	<u>0,022</u> 0,012–0,034
Вафельная дрена**	2016: 06.07, 10.07 (2), 14.07	4	4,12–6,32	0,020–0,030
Кисельная дрена	2016: 15.07, 16.07	2	5,85–7,36	0,031–0,050
Марципановая дрена	2016: 06.07, 13.07, 17.07	3	<u>1,94</u> 1,51–2,44	<u>0,020</u> 0,008–0,029
Ручей Сухой	2016: 07.07	1	3,91	0,072
Бассейн ручья Контактный, Верхнеколымское нагорье, Магаданская область, Россия				
Беличья дрена	2016: 29.07	4	Не определялся	<u>0,006</u> 0,005–0,008

* в числителе – среднее арифметическое, в знаменателе – пределы изменения.

** результаты двух из четырех экспериментов выбракованы из-за нарушения условия бесприточности исследуемого участка подповерхностного потока.

Обсуждение результатов

Согласно определению каменный поток [Мудров, 2007] представляет собой линейно-вытянутое вниз по склону скопление каменных глыб и щебня (коллювия), обычно медленно движущееся вдоль склона под влиянием криогенной десерпции, солифлюкции, дробления и других процессов¹. Часто под скоплением глыб формируется водный поток. Каменные потоки широко распространены в гольцовой зоне и часто спускаются далеко в лесную зону нижнего высотного пояса Сихотэ-Алиня и других горных стран Дальнего Востока, образуя так называемые каменные реки. Различают каменные потоки активные (block streams), то есть движущиеся и практически обнаженные, и неактивные – неподвижные (block fields). Последние, унаследованные от холодной эпохи позднего плейстоцена по данным датировок, располагаются ниже по склону по отношению к активным, зарастают лесом и перекрыты слабо развитым почвенным слоем [Короткий, 1984]. Они, по терминологии работы [Тимофеев, 1978], представляют собой скрытые каменные потоки. Они далеко не всегда отчетливо выражены в рельефе, что в сочетании с плотным лесным покровом серьезно осложняет их выявление с помощью методов дистанционного зондирования Земли. В частности, нами выявлены слабо вырезанные расходящиеся двойные тальвеги, определяющие W-образные формы поперечных сечений «долин» каменных потоков в нижних частях склонов, при этом сами каменные потоки выполняют конусы выноса выпуклой формы, обрамленные тальвегами и достигающие ширины десятков метров в нижней части.

Нужно отличать каменные потоки от выделяемого в почвенном профиле ненарушенных горных ландшафтов юга Дальнего

Востока типичный декольматированный фрактолитовый элювиальный по мелкозему горизонт вымывания, где количество щебня размерами крупнее 10 см достигает 38–52% [Аржанова, Елпатьевский, 1990]. Каменные потоки имеют гораздо большую мощность и преимущественно каменно-глыбовый состав (преобладание размеров глыб более 30 см), что указывает на существенно более высокую их водопроницаемость (хотя к крупнообломочным образованиям относятся фракции размером более 10 см [Говорушко, 1986]). Вскрытые дорожными выемками в верховьях реки Уссури (южный Сихотэ-Алинь) такие каменные потоки, практически не выраженные в рельефе и покрытые густой растительностью, представляют собой U или V-образные практически лишенные песчано-суглинистого заполнителя глыбовые «линзы» в толще щебнистых склоновых отложений. Ширина таких линз составляет от 1–3 до первых десятков метров, мощность – в пределах 1–2 метров (рисунок 2). В верхних частях некоторых склонов наблюдаются слабо задернованные плащеобразные грубообломочные отложения, промытые от мелкозема.

В бассейне реки Падь Васькова на склонах северной экспозиции верхние части крупных каменных потоков (Вафельная и Кисельная дрены) – зоны их питания – в основном обнажены и могут идентифицироваться на снимках со спутников и беспилотных летательных аппаратов.

В тундровых и редколесных ландшафтах Верхнеколымского нагорья каменные потоки, как правило, открыты (рисунки 3–5) и могут быть приурочены к дайковым и штокообразным интрузивным телам раннемелового возраста, которые, согласно [Говорушко, 1986], часто встречаются в этом районе.

¹ Геологический словарь: в 2-х томах. Том 1. А–М. М.: Недра, 1978. 486 с.



Рисунок 2. Задернованный каменный поток, вскрытый дорожной выемкой. Бассейн реки Изюбринка, верховья реки Уссури. Фото В.В. Шамова.

Figure 2. A turfed block stream outcropped during a road construction. The Izyubrinka River basin, the Ussuri River headwaters. Photo by V. Shamov.



Рисунок 3. Каменные полосы вод (отмечены белыми стрелками), почти не выраженные в рельефе и выделяющиеся на общем фоне более густой растительностью благодаря неглубокому расположению грунтовых вод. Бассейн ручья Контактный, Колымское нагорье. Фото О.М. Макарьевой.

Figure 3. Stone stripes (marked with white arrows) that almost have no their own hollows and stand out with more dense vegetation due to shallow groundwater. The Kontaktovyi Creek Basin, Kolymskoye Uplands.

Photo by O. Makaryeva.



Рисунок 4. Измерение скорости течения воды в каменном потоке (дрена Беличья). Бассейн ручья Контактный, Колымское нагорье. Фото О.М. Макарьевой.

Figure 4. A flow rate measurement in a block stream (Belichya subsurface watercourse). The Kontaktovyi Creek Basin, Kolymskoye Uplands. Photo by O. Makaryeva.



Рисунок 5. Каменная полоса с залеганием, не согласным с общим уклоном склона (отмечена стрелкой). Бассейн ручья Контактный, Колымское нагорье. Фото О.М. Макарьевой.

Figure 5. A stone stripe disagreeing with the general slope (marked with a white arrow). The Kontaktovyi Creek Basin, Kolymskoye Uplands. Photo by O. Makaryeva.

По нашим наблюдениям мелкозем, накапливающийся в нижней части профиля тела каменного потока, формирует слабопроницаемую поверхность, на которой стекающая по склону и просочившаяся с поверхности вода быстро

концентрируется. Благодаря этому в каменных потоках свободно текут, по сути, приповерхностные подземные ручьи, которые авторы условно обозначили термином «дрены» [Тарбеева, Гарцман, 2017].

Любой каменный поток имеет зону формирования, зону транспортировки и зону аккумуляции вещества [Полунин, 1989]. Эти зоны могут отличаться специфической фациальной и субфациальной структурой [Тюрин, Романовский, Полтев, 1982], которая определяет микрорельеф поверхности каменного потока (рисунок 6). В зоне аккумуляции рыхлого

материала глубина склонового потока существенно возрастает. Такие потоки – как на Сихотэ-Алине, так и в Колымском нагорье – не вскрываются разрезами глубиной 1 м, в связи с чем на схемах (рисунок 6) они показаны «теряющимися» в мощных обломочных чехлах нижних частей склонов.

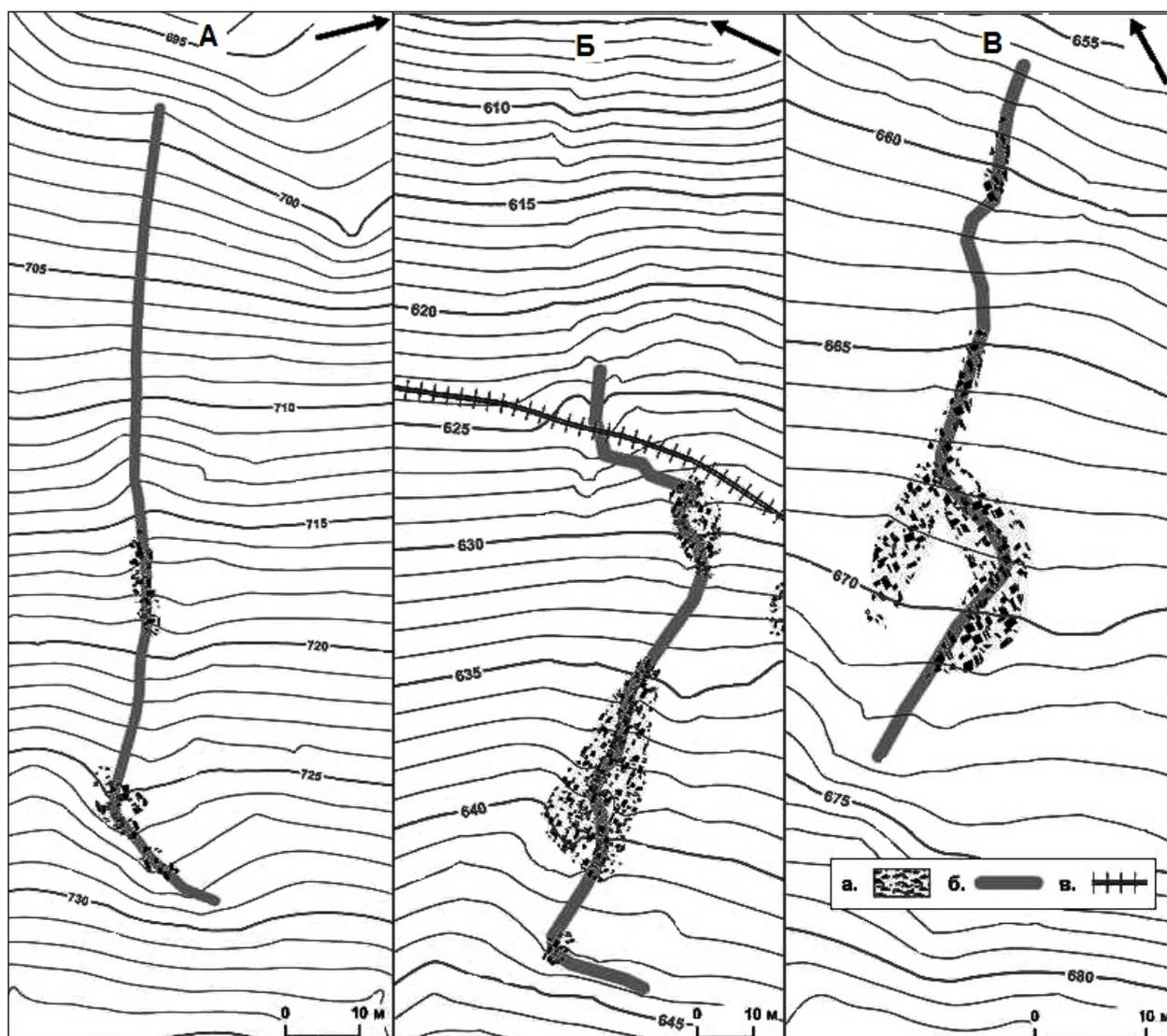


Рисунок 6. Схемы склонов с задернованными каменными потоками в бассейне реки Правая Соколовка по данным тахеометрических съемок: А – Ботаническая дрена; Б – Жильцовская дрена; В – Дремучая дрена. Условные обозначения: а. – слабозадернованные участки поверхности, сложенные крупнообломочным материалом; б. – склоновый подповерхностный водный поток; в. – грунтовая дорога. Стрелками показано направление на север.

Figure 6. The schemes of the turfed block streams as based on tachymetric survey of the slopes: А – Botanicheskaya subsurface watercourse; Б – Zhil'tsovskaya subsurface watercourse; В – Dremuchaya subsurface watercourse. Legend: а. – weakly turfed block stripes, б. – a subsurface watercourse, в. – a wood trail. The arrows point the North direction.

Можно предположить, что в горах Сихотэ-Алиня оползневое происхождение имеют многие задернованные каменные потоки. Оползни могут быть вызваны как гидрологическими эксцессами [Короткий, 1984], так и подвижками земной коры. На вероятный оползневый генезис указывают стенки отрыва высотой от 1 до 5 м, выявленные авторами данной статьи в истоках некоторых каменных потоков – в верхних и средних частях склонов. У подножий таких стенок часто формируются уступы и выходят родники, ниже по склону теряющиеся в крупнообломочных отложениях. Такие уступы в рельефе, по терминологии работы [Кулаков, 1990], могут характеризовать локальные ступени разгрузки подземных вод.

Отдельной задачей остается генезис каменных потоков, их эволюция и связь с геотектоническими и геоморфологическими процессами на склонах [Тюрин, 1982; Короткий, 1984; Seto, 2011; Suzuki et al., 2013]. Выше было сказано, что образование каменных потоков в Сихотэ-Алине как реликтовых курумов связывают с холодным климатом в позднем плейстоцене [Короткий, 1984]. Вместе с тем, в горах Корейского полуострова и Японского архипелага в условиях более теплого и влажного современного муссонного климата описан механизм формирования каменных потоков, обусловленный вымыванием заполнителя из изначально сформировавшегося оползневого тела водным потоком, сосредоточенным по стенке отрыва оползня [Seto, 2011; Seto, Kim, Tanaka, 2015].

По данным некоторых авторов [Полунин, 1989; Гаврилов, 2014] гравитационные геоморфологические процессы (в том числе оползни, обвалы, осыпи, каменные потоки) тесно связаны с процессами дробления, катаклаза, милонитизации пород в зонах разломов, на границе дифференцированно перемещающихся блоков. Вне выраженных долин водотоков и ложбин стока эти зоны контролируют также места миграции и разгрузки трещинных подземных вод, обуславливая образование конусов выноса в нижних частях склонов и формирование линейных кор выветривания.

Последние, согласно Геологическому словарю¹, возникают вдоль тектонических трещин или на контакте разных по составу пород и имеют форму вытянутых жилообразных тел. Такие тела простираются в плане на сотни метров, а на глубину – обычно на несколько десятков метров и более.

На приуроченность каменных (курумных) потоков к зонам тектонических нарушений и морозобойных трещин, вытянутых вниз по склону, указывается также другими авторами [Короткий, Никольская, Скрыльник, 1976; Тюрин, Романовский, Полтев, 1982]. Отмечается, что в условиях многолетней или длительной сезонной мерзлоты в морозобойных трещинах, которые проникают на значительную глубину в скальные породы, наследуя их первичную тектоническую трещиноватость, концентрируются потоки атмосферных и склоновых вод [Тюрин, Романовский, Полтев, 1982; Глотова, Глотов, 2012].

Известно, что региональная структура гидрогеологических резервуаров генетически и пространственно связана с долгоживущими тектоническими нарушениями и их узлами, которые контролируют зоны сочленения гидрогеологических массивов и артезианских бассейнов [Кулаков, 1990; Сорокина, 1992; Caine, Evans, Forster, 1996; Сорокина, 2006; Bense et al., 2013]. Можно полагать, что в районах влияния крупных региональных разломов (в нашем случае в осевой части хребта Сихотэ-Алинь [Захаров и др., 2020]) небольшие, имеющие масштабы склона, разрывные нарушения, оперяющие локальные разломы, в свою очередь могут контролировать устойчивые подповерхностные водопродводящие каналы (дрены) такого же масштаба. Каменные потоки на склонах речных долин, по нашему мнению, могут индицировать такие «сублокальные» нарушения и, следовательно, существенную, наиболее развитую часть приповерхностной дренажной сети, в которой происходит быстрая концентрация и разгрузка склоновых вод в горные реки и озера. Скорости течения воды и дебиты при этом, как показывают авторские эксперименты, вполне сопоставимы с таковыми в

открытых первичных водотоках в периоды межени.

На основе результатов наших наблюдений – с учетом обобщенной методики анализа режима и строения областей питания родников в карстовых районах Пьемонта, Италия [Galeani et al., 2011] и данных анализа среднего времени добегания (mean transit time) склоновых вод к дренирующему склон водотоку в Скалистых горах, Орегон, США [McGuire, McDonnel, 2010] – предлагается условно разделить сеть подземных предпочтительных водопродводящих путей склонового масштаба на три основные структурные группы:

- 1) система дрен – главных проводников-каналов (conduits);
- 2) система доменов фильтрационного потока (macropore flow);
- 3) система путей матричного потока (matrix flow).

Дренажная сеть первого из перечисленных типов наиболее быстро (за несколько часов – первые десятки часов) и непродолжительное время обеспечивает реакцию водотока на выпадение дождя (event water) и, как правило, происходит их потепление и разбавление дождевыми водами. В этой сети наблюдается свободное стекание склоновых вод, причем по авторским наблюдениям водность таких потоков после выпадения серии обильных дождей (с суммарным слоем 100–150 мм/сут) может возрастать на 2 порядка и более, при этом наблюдается выход потоков на поверхность.

Система фильтрационных доменов воду вбирает и отдает медленнее (от нескольких до многих суток), вытесняя накопленный ранее влагозапас по принципу поршневого механизма (piston effect) [Uchida, van Meerveld, McDonnel, 2005; Galeani et al., 2011]. Содержание растворенных веществ в речной воде при этом возрастает по мере вытеснения более холодной «старой воды» просачивающейся «новой водой» в силу достаточности времени для выщелачивания этих веществ из дренируемых пород и понижения температуры [Galeani et al., 2011].

Система путей матричного (дисперсного) стока соответствует предпочтительным

водопродводящим путям в масштабе почвенного профиля [Умарова, 2011; Galeani et al., 2011], контролирует малоподвижную часть почвенных вод и, вообще говоря, не является значимой для стокоформирования в том смысле, что практически не различима в отклике рек на межгодовой и многолетний режим атмосферного увлажнения. Скорость движения воды в системе путей дисперсного стока составляет порядка 0,01 мм/с [Angermann et al., 2017].

С учетом классификаций трещин горных пород [Степанов, 1989] есть основание полагать, что каменные потоки, а следовательно и связанные с ними системы подземных дрен, вероятно, приурочены к относительно крупным – в масштабе склона – локальным разрывным нарушениям или, по В.Н. Жиленкову [1975], разломам. Линейные размеры таких структур в данном случае исчисляются сотнями и первыми тысячами метров, ширина – первыми метрами.

Системы доменных предпочтительных водопродводящих путей, очевидно, сосредоточены в местах развития трещин (macropore flow [Weiler, 2017]) и почвенных трубок различного генезиса (pipeflow [Uchida, van Meerveld, McDonnel, 2005]) в пределах элювиальных почвенных горизонтов. Такие фильтрационные каналы имеют протяженность от 10 см до первых десятков метров (в районах распространения трещинных вод) и ширину от 0,1 до десятков сантиметров [Степанов, 1989; Гаврилов, 2014].

Системы дисперсных водопродводящих путей контролируются, по всей вероятности, сетью микротрещин и капиллярных пор длиной существенно менее 10 см и шириной менее 0,1 см [Мудров, 2007], определяя «фестонный» (в виде отдельных «языков») вид фронта вертикального промачивания в почвенном профиле [Умарова, 2011], но с учетом маломощности аккумулятивного горизонта и высокой каменистости почв.

Выводы

Полученные авторами данные показывают, что склоновый сток осуществляется в виде постоянной сети подповерхностных потоков – дрен, контролируемых системой

преимущественных водопроводящих путей. Наиболее крупные из этих потоков по своим динамическим характеристикам сопоставимы с первичными поверхностными водотоками горных районов в периоды межени и, по всей видимости, представляют собой основную форму взаимодействия склонового и руслового стока в пределах речного бассейна. Крупные предпочтительные водопроводящие пути масштаба склона часто приурочены к каменным потокам – узким полосам крупнообломочных отложений, которые могут быть связаны с небольшими разрывными нарушениями, вероятно тектонического генезиса. Они далеко не всегда выражены в рельефе и под пологом леса трудно выявляются средствами дистанционного зондирования.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам НИР 0272-2019-0027 (ТИГ ДВО РАН) и 0147-2019-0001 (ИВП РАН) при финансовой поддержке РФФИ (гранты 20-35-70027, 19-05-00353, 17-05-00217). Авторы выражают благодарность к.г.н. А.М. Тарбеевой (МГУ им. М.В. Ломоносова), к.г.н. П.А. Беляковой (ИВП РАН), к.г.н. Л.С. Лебедевой и к.г.н. О.М. Макарьевой (ИМЗ СО РАН), к.г.-м.н. А.А. Абрамову (ИФХиБПП РАН), студентам МГУ им. М.В. Ломоносова Э.-Л.Д. Ликарь, А.А. Мироненко, К.М. Панышевой, К.К. Жбакову, З.А. Сучилиной, а также студенту ДВФУ Д.А. Касурову за активное участие в полевых экспериментах и наблюдениях.

Литература

Алексеев В.Р., Бояринцев Е.Л., Гопченко Е.Д., Сербов Н.Г., Завалий Н.В. Механизм криогенного регулирования стока в

Для развития исследований в данном направлении предполагается адаптация и развитие технических и модельных аспектов трассерной методологии [Гарцман, Шапов, 2015; Губарева и др., 2019], а также географическое расширение исследований предпочтительных водопроводящих путей в масштабе склонов. Детальное изучение строения склоновых отложений с позиций структурной гидрогеологии и водного режима горных склонов в различных физико-географических условиях позволит проверить гипотезу о существенной роли активных и реликтовых каменных потоков в концентрации гравитационных склоновых вод и, следовательно, в формировании дождевых паводков в бассейнах горных рек, особенно в районах с резкими внутрисезонными колебаниями атмосферного увлажнения.

Acknowledgments

The work was implemented in the framework of the state assignments within the Research Topic No. 0272-2019-0027 (Pacific Geographical Institute) and the Research Topic No. 0147-2019-0001 (Water Problems Institute) and, also, at financial support by the Russ. Foundation for Basic Research (grants No. 20-35-70027, 19-05-00353, and 17-05-00217). The authors express their gratitude to Dr. A. Tarbeeva (Lomonosov Moscow State University), Dr. P. Belyakova (Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences), Dr. L. Lebedeva and Dr. O. Makaryeva (Mel'nikov Permafrost Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences), Dr. A. Abramov (Institute for Physical, Chemical and Biological Problems in Soil Science of Russian Academy of Sciences), the students E.-L. Likar, A. Mironenko, K. Panysheva, K. Zhabakov and Z. Suchilina (Lomonosov Moscow State University) and D. Kasurov (Far Eastern Federal University) for their active participation in field experiments and observations.

References

Alekseev V.R., Boiaryntsev Ye.L., Gopchenko Ye.D., Serbov M.G., Zavaliy N.V. Mekhanizm kriogennogo regulirovaniya stoka v

формировании водного баланса малых горных рек зоны многолетнемерзлых пород // Украинский гидрометеорологический журнал. 2011. № 8. С. 182–194.

Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 196 с.

Бэфани А.Н., Урываев П.А., Бэфани Н.Ф., Одрова Т.В., Федорей В.Г. Экспериментальные исследования дождевого стока в Приморье (1962 год) // Вопросы формирования паводков на реках Дальнего Востока (по материалам экспедиционных исследований 1962 года) / Труды Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института. Вып. 22. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. С. 3–123.

Болдескул А.Г., Шамов В.В., Гарцман Б.И., Кожевникова Н.К. Ионный состав генетических типов вод малого речного бассейна: стационарные исследования в центральном Сихотэ-Алине // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 90–101.

Василенко Н.Г. Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб: Нестор-История, 2013. 672 с.

Виноградов Ю.Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 262 с.

Гаврилов А.А. Разрывные нарушения южного Приморья как зоны геодинамического риска (по данным геолого-геоморфологического изучения побережий залива Петра Великого) // Вестник Дальневосточного отделения Российской Академии Наук. 2014. № 4 (176). С. 75–86.

Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю., Орляковский А.В., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Шекман Е.А. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 2. С. 123–132. DOI: [10.31857/S0321059620020042](https://doi.org/10.31857/S0321059620020042).

Гарцман И.Н., Лыло В.М., Черненко В.Г. Паводочный сток рек Дальнего Востока / Труды

formirovaniy vodnogo balansa malyykh gornykh rek zony mnogoletnemerzlykh porod [The mechanism of cryogenic runoff control at the formation of water balance of small mountain rivers in the area of permafrost rocks]. *Ukrains'kii gidrometeorologichnii zhurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 2011, no. 8, pp. 182–194. (In Russian; abstract in English).

Angermann L., Jackisch C., Allroggen N., Sprenger M., Zehe E., Tronicke J., Weiler M., Blume T. Form and function in hillslope hydrology: characterization of subsurface flow based on response observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, iss. 7, pp. 3727–3748. DOI: [10.5194/hess-21-3727-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3727-2017).

Arzhanova V.S., Elpatyevskii P.V. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez* [Geochemistry of landscapes and technogenesis]. Moscow, Publ. Nauka, 1990. 196 p. (In Russian).

Befani A.N., Uryvaev P.A., Befani N.F., Odrova T.V., Fedorey V.G. Eksperimental'nye issledovaniya dozhdevogo stoka v Primor'e (1962 g.) [Experimental investigation into rain runoff in Primorye (1962)]. In: *Voprosy formirovaniya pavodkov na rekakh Dal'nego Vostoka (po materialam ekspeditsionnykh issledovaniy 1962 g.) [Issues of flood generation in rivers of Far East (based on the field studies in 1962)]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1966, pp. 3–123. (In Russian).

Bense V.F., Gleeson T., Loveless S.E., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 2013, vol. 127, pp. 171–192. DOI: [10.1016/j.earscirev.2013.09.008](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008).

Boldeskul A.G., Shamov V.V., Gartsman B.I., Kozhevnikova N.K. Ionnyi sostav geneticheskikh tipov vod malogo rechnogo basseina: statsionarnye issledovaniya v tsentral'nom Sikhote-Aline [Main ions in water of different genetic types in a small river basin: case experimental studies in Central Sikhote-Alin]. *Tikhookeanskaya Geologia [Pacific Geology]*, 2014, vol. 33, iss. 2, pp. 90–101. (In Russian; abstract in English).

Brutsaert W. *Hydrology: an Introduction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 618 p. DOI: [10.1017/CBO9780511808470](https://doi.org/10.1017/CBO9780511808470).

Дальневосточного научно-исследовательского гидрометеорологического института. Вып. 34. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 264 с.

Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 589–599. DOI: [10.7868/S0321059615060048](https://doi.org/10.7868/S0321059615060048).

Глотова Л.П., Глотов В.Е. Роль подземных вод в общем стоке малых горных рек бассейна реки Колымы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1 (9). С. 2321–2324.

Говорушко С.М. Курумовый морфолитогенез. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 120 с.

Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Гарцман Б.И., Шамов В.В. Анализ природных трассеров и генетических составляющих стока в моделях смешения (на примере малых бассейнов в Приморье) // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 4. С. 387–399. DOI: [10.7868/S0321059616040064](https://doi.org/10.7868/S0321059616040064).

Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Луценко Т.Н., Болдескул А.Г., Кожевникова Н.К., Лупаков С.Ю. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 6. С. 126–140. DOI: [10.31857/S2587-556620196126-140](https://doi.org/10.31857/S2587-556620196126-140).

Жиленков В.Н. Руководство по методике определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных оснований гидротехнических сооружений. Л.: Энергия, 1975. 75 с.

Жильцов А.С. Гидрологическая роль горных хвойно-широколиственных лесов Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2008. 332 с.

Захаров В.С., Симонов Д.А., Гильманова Г.З., Диденко А.Н. Фрактальная геометрия речной сети и неотектоника южного Сихотэ-Алиня // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39. № 6. С. 48–64. DOI: [10.30911/0207-4028-2020-39-6-48-64](https://doi.org/10.30911/0207-4028-2020-39-6-48-64).

Карасев И.Ф., Шумков И.Г. Гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 384 с.

Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 1996, vol. 24, iss. 11, pp. 1025–1028. DOI: [10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2).

Galeani L., Vigna B., Banzato C., Lo Russo S. Validation of vulnerability estimator for spring protection areas: the VESPA index. *Journal of Hydrology*, 2011, vol. 396, iss. 3–4, pp. 233–245. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2010.11.012](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.11.012).

Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Shamov V.V., Shekman E.A., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M. The forms of linear structure of overland flow in medium-height mountain regions: case study of the Sikhote-Alin // *Water Resources*, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 179–188. DOI: [10.1134/S0097807820020049](https://doi.org/10.1134/S0097807820020049). (Russ. ed.: Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Yu., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M., Shamov V.V., Shekman E.A. Formy lineinoi organizatsii sklonovogo stoka v srednegor'e (na primere Sikhote-Alinya). *Vodnye resursy*, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 123–132. DOI: [10.31857/S0321059620020042](https://doi.org/10.31857/S0321059620020042)).

Gartsman I.N., Lylo V.M., Chernenko V.G. *Pavodochnyi stok rek Dal'nego Vostoka [Flood runoff of the Far East rivers]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1971. 264 p. (In Russian).

Gartsman B.I., Shamov V.V. Field studies of runoff formation in the Far East Region based on modern observational instruments. *Water Resources*, 2015, vol. 42, iss. 6, pp. 766–775. DOI: [10.1134/S0097807815060044](https://doi.org/10.1134/S0097807815060044). (Russ. ed.: Gartsman B.I., Shamov V.V. Naturnye issledovaniya stokoformirovaniya v Dal'nevostochnom regione na osnove sovremennykh sredstv nablyudenii *Vodnye resursy*, 2015, vol. 42, iss. 6, pp. 589–599. DOI: [10.7868/S0321059615060048](https://doi.org/10.7868/S0321059615060048)).

Gavrilov A.A. Razryvnye narusheniya yuzhnogo Primor'ya kak zony geodinamicheskogo riska (po dannym geologo-geomorfologicheskogo izucheniya poberezhii zaliva Petra Velikogo) [Faults of the South Primorye as zone of geodynamic risks (according to the data of geologic and geomorphologic investigation of shores in the Peter the Great Bay)]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi Akademii Nauk [Vestnik of*

- Короткий А.М. Оледенения и псевдогляциальные образования юга Дальнего Востока СССР // Плейстоценовые оледенения Востока Азии. Магадан: Изд-во Северо-вост. комплексного института ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 186–192.
- Короткий А.М., Никольская В.В., Скрьльник Г.П. Сходство и различие в общем и частном морфолитогенезе в условиях муссонного и континентального климата // Климатическая геоморфология Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 124–138.
- Кулаков В.В. Формирование и методы оценки естественных ресурсов подземных вод Комсомольского горнорудного района // Природные воды Дальнего Востока / Вопросы географии Дальнего Востока. Сборник 13. Хабаровск: Хабаровский КНИИ ДВНЦ АН СССР, Приамурский (Хабаровский) фил. геогр. об-ва СССР, 1973. Хабаровск: Книжное издательство, 1973. С. 274–283.
- Кулаков В.В. Месторождения пресных подземных вод Приамурья. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. 152 с.
- Михайлов В.М. Пойменные талики Северо-Востока России. Новосибирск: ГЕО, 2013. 244 с.
- Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор: основные понятия и определения. М.: Научный мир, 2007. 316 с.
- Назаренко Л.Ф., Бажанов В.А. Геология Приморского края. Ч. 1. Стратиграфия. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1989. 68 с.
- Полунин Г.В. Динамика и прогноз экзогенных процессов: физические аспекты экзогенных процессов. М.: Наука, 1989. 232 с.
- Сорокина А.Т. Гидрогеологические структуры Приамурья, их эволюция и флюидный режим // Тихоокеанская геология. 1992. Т. 11. № 3. С. 123–133.
- Сорокина А.Т. Роль разломов в формировании обводненных зон Алданской гидрогеологической области // Тихоокеанская геология. 2006. Т. 25, № 6. С. 57–66.
- Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*], 2014, iss. 4 (176), pp. 75–86. (In Russian; abstract in English).
- Gerke H.H., German P., Niebel J. Preferential and unstable flow: from the pore to the catchment scale. *Vadose Zone Journal*, 2010, vol. 9, iss. 2, pp. 207–212. DOI: [10.2136/VZJ2010.0059](https://doi.org/10.2136/VZJ2010.0059).
- Glotova L.P., Glotov V.E. Rol' podzemnykh vod v obshchem stoke mal'nykh gorn'nykh rek basseina reki Kolymy [Role of underground waters in the common drain of small mountain rivers at Kolyma River]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 2012, vol. 14, iss. 1 (9), pp. 2321–2324. (In Russian; abstract in English).
- Govorushko S.M. *Kurumovyi morfolitogenez [Kurum morpholithogenesis]*. Vladivostok, Publ. of Far East Science Center of the USSR Academy of Sciences, 1986. 120 p. (In Russian).
- Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analysis of natural tracers and genetic runoff components in mixing models: case study of small basins in Primor'e. *Water Resources*, 2016, vol. 43, iss. 4, pp. 629–639. DOI: [10.1134/S0097807816040060](https://doi.org/10.1134/S0097807816040060). (Russ. ed.: Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Gartsman B.I., Shamov V.V. Analiz prirodnykh trasserov i geneticheskikh sostavlyayushchikh stoka v modelyakh smesheniya (na primere mal'nykh basseinov v Primor'e). *Vodnye resursy*, 2016, vol. 43, iss. 4, pp. 387–399. DOI: [10.7868/S0321059616040064](https://doi.org/10.7868/S0321059616040064)).
- Gubareva T.S., Gartsman B.I., Shamov V.V., Lutsenko T.N., Boldeskul A.G., Kozhevnikova N.K., Lupakov S.Yu. Runoff components of small catchments in Sikhote-Alin: summarizing the results of field measurements and tracer modeling. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya]*, 2019, iss. 6, pp. 126–140. DOI: [10.31857/S2587-556620196126-140](https://doi.org/10.31857/S2587-556620196126-140). (In Russian; abstract in English).

Степанов В.М. Введение в структурную гидрогеологию. М.: Недра, 1989. 229 с.

Тарбеева А.М., Гарцман Б.И. Морфогенез первичных звеньев гидрографической сети: натурные исследования в Центральном Сихотэ-Алине // География и природные ресурсы. 2017. № 4. С. 114–121. DOI: [10.21782/GIPRO206-1619-2017-4\(114-121\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2017-4(114-121)).

Тимофеев Д.А. Терминология денудации и склонов. М.: Наука, 1978. 242 с.

Триас и юра Сихотэ-Алиня. Книга 1. Терригенный комплекс. Владивосток: Дальнаука, 2004. 417 с.

Тюрин А.И., Романовский Н.Н., Полтев Н.Ф. Мерзлотно-фациальный анализ курумов. М.: Наука, 1982. 150 с.

Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 266 с.

Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 68 с.

Худяков Г.И., Денисов Е.П., Короткий А.М., Кулаков А.П., Никонова Р.И., Чернобровкина Е.И. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Юг Дальнего Востока. М.: Наука, 1972. 424 с.

Шенелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2011. 169 с.

Angermann L., Jackisch C., Allroggen N., Sprenger M., Zehe E., Tronicke J., Weiler M., Blume T. Form and function in hillslope hydrology: characterization of subsurface flow based on response observations // Hydrology and Earth System Sciences. 2017. Vol. 21. Iss. 7. P. 3727–3748. DOI: [10.5194/hess-21-3727-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3727-2017).

Bense V.F., Gleeson T., Loveless S.E., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology // Earth-Science Reviews. 2013. Vol. 127. P. 171–192. DOI: [10.1016/J.EARSCIREV.2013.09.008](https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2013.09.008).

Brutsaert W. Hydrology: an Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 618 p. DOI: [10.1017/CBO9780511808470](https://doi.org/10.1017/CBO9780511808470).

Karasev J.F., Shumkov I.G. *Gidrometriya [Hydrometry]*. Leningrad, Publ. Gidrometeizdat, 1985. 384 p. (In Russian; abstract in English).

Khanchuk A.I., Ratkin V.V., Ryazantseva M.D., Golozubov V.V., Gonokhova N.G. *Geology and minerals deposits of Primorsky krai (territory)*. Vladivostok, Publ. Dal'nauka. 1996. 91 p. (Russ. ed.: *Geologiya i poleznye iskopaemye Primorskogo kraja: ocherk*. Vladivostok, Publ. Dal'nauka. 1995. 68 p.).

Khudyakov G.I., Denisov E.P., Korotkii A.M., Kulakov A.P., Nikonova R.I., Chernobrovkina E.I. *Istoriya razvitiya rel'efa Sibiri i Dal'nego Vostoka. Yug Dal'nego Vostoka [Evolution history of the Siberia and Far East terrain: the South of Far East]*. Moscow, Publ. Nauka, 1972. 424 p. (In Russian).

Korotkii A.M. Oledeneniya i psevdoglyatsial'nye obrazovaniya yuga Dal'nego Vostoka SSSR [Glaciation and pseudo-glacial formations of the South of the Far East of the USSR]. In: *Pleistotsenovye oledeneniya Vostoka Azii [Pleistocene glaciations of the East of Asia]*. Magadan, Publ. of North-East Integrated Scientific Research Institute of Far East Science Center of the Academy of sciences of the USSR, 1984, pp. 186–192. (In Russian).

Korotkii A.M., Nikol'skaya V.V., Skryl'nik G.P. Skhodstvo i razlichie v obshchem i chastnom morfolitogeneze v usloviyakh mussonnogo i kontinental'nogo klimata [Similarity and differences in general and partial morpholithogenesis under monsoon and continental climate conditions]. In: *Klimaticheskaya geomorfologiya Dal'nego Vostoka [Climatic geomorphology of the Far East]*. Vladivostok, Far East Science Center of the Academy of sciences of the USSR Publ. 1976, pp. 124–138. (In Russian).

Kulakov V.V. Formirovaniye i metody otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod Komsomol'skogo gornorudnogo rayona [Formation and methods of assessing the natural groundwater resources of the Komsomolsk mining region]. In: *Prirodnye vody Dal'nego Vostoka [Natural waters of the Far East]*. Khabarovsk, 1973, pp. 274–283. (In Russian).

- Caine J.S., Evans J.P., Forster C.B. Fault zone architecture and permeability structure // *Geology*. 1996. Vol. 24. Iss. 11. P. 1025–1028. DOI: [10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO.2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO.2).
- Galeani L., Vigna B., Banzato C., Lo Russo S. Validation of vulnerability estimator for spring protection areas: the VESPA index // *Journal of Hydrology*. 2011. Vol. 396. Iss. 3–4. P. 233–245. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2010.11.012](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.11.012).
- Gerke H.H., German P., Niebel J. Preferential and unstable flow: from the pore to the catchment scale // *Vadose Zone Journal*. 2010. Vol. 9. Iss. 2. P. 207–212. DOI: [10.2136/VZJ2010.0059](https://doi.org/10.2136/VZJ2010.0059).
- McGuire K.J., McDonnell J.J. Hydrological connectivity of hillslopes and streams: Characteristic time scales and nonlinearities // *Water Resources Research*. 2010. Vol. 46. Iss. 10. W10543. DOI: [10.1029/2010WR009341](https://doi.org/10.1029/2010WR009341).
- Pierce A.J., Stewart M.K., Sklash M.G. Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from? // *Water Resources Research*. 1986. Vol. 22. Iss. 8. P. 1263–1272. DOI: [10.1029/WR022i008p01263](https://doi.org/10.1029/WR022i008p01263).
- Seto M. Geomorphic processes since the later last glacial indicated by the formation of block deposition features in mid-latitude temperate zones // *Weathering: Types, Processes and Effects* / Matthew J.C. (ed.). New York: Nova Science Publishers, 2011. P. 69–128.
- Seto M., Kim S-H., Tanaka Y. Hydrological survey of the block stream in Mt. Maneo, South Korea // *Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием) «Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии»* (г. Якутск, 22–28 июня 2015 г.). Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2015. С. 352–355.
- Suzuki M., Inagaki H., Ueno S., Ujihara M., Ohno H., Ogawa K., Goto S., Nakamura Y., Hara S., Mima K. Large-scale slope failures and their mechanism due to heavy rainfall by Typhoon No.12 in 2011 in the Kii Peninsula of Japan // *Proceedings of the 6th Civil Engineering Conference in the Asian*
- Kulakov V.V. *Mestorozhdeniya presnykh vod Priamurya [Fresh groundwater deposits at the Amur Region]*. Vladivostok, Publ. of FEB AS USSR, 1990. 152 p. (In Russian).
- McGuire K.J., McDonnell J.J. Hydrological connectivity of hillslopes and streams: Characteristic time scales and nonlinearities. *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, iss. 10, W10543. DOI: [10.1029/2010WR009341](https://doi.org/10.1029/2010WR009341).
- Mikhailov V.M. *Poymennye taliki Severo-Vostoka Rossii [Floodplain taliks of the Northeast of Russia]*. Novosibirsk, Publ. GEO, 2013. 244 p. (In Russian).
- Mudrov Yu.V. *Merzlotnye yavleniya v kriolitozone ravnin i gor: osnovnye ponyatiya i opredeleniya. [Permafrost phenomena in cryolithozone of plains and mountains: basic concepts and definitions]*. Moscow, Publ. Nauchnyi mir, 2007. 316 p. (In Russian).
- Nazarenko L.F., Bazhanov V.A. *Geologiya Primorskogo kraja. Chast' I. Stratigrafiya [Geology of Primorsky Territory. Part I. Stratigraphy]*. Vladivostok, Far East Branch of the Academy of Sciences of the USSR. 1989. 68 p. (In Russian).
- Pierce A.J., Stewart M.K., Sklash M.G. Storm runoff generation in humid headwater catchments. 1. Where does the water come from? *Water Resources Research*, 1986, vol. 22, iss. 8, pp. 1263–1272. DOI: [10.1029/WR022i008p01263](https://doi.org/10.1029/WR022i008p01263).
- Polunin G.V. *Dinamika i prognoz ekzogennykh protsessov: fizicheskie aspekty ekzogennykh protsessov [Dynamics and prediction of exogenous processes: physical aspects of exogenous processes]*. Moscow, Publ. Nauka, 1989. 232 p. (In Russian).
- Seto M. Geomorphic processes since the later last glacial indicated by the formation of block deposition features in mid-latitude temperate zones. In: Matthew J.C. (ed.) *Weathering: Types, Processes and Effects*. New York: Nova Science Publishers, 2011, pp. 69–128.
- Seto M., Kim S-H., Tanaka Y. Hydrological survey of the block stream in Mt. Maneo, South Korea. *Proceedings of the National conference on*

Region (CECAR6) «Embracing the Future through Sustainability» (Jakarta, Indonesia, 20-22 August, 2013). P. 35–42.

Uchida T., van Meerveld I., McDonnell J.J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response // *Journal of Hydrology*. 2005. Vol. 311. Iss. 1–4. P. 117–133. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2005.01.012](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2005.01.012).

Uhlenbrook S. Catchment hydrology – a science in which all processes are preferential // *Hydrological Processes*. 2006. Vol. 20. Iss. 16. P. 3581–3585. DOI: [10.1002/hyp.6564](https://doi.org/10.1002/hyp.6564).

Weiler M. Macropores and preferential flow – a love-hate relationship // *Hydrological Processes*. 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 15–19. DOI: [10.1002/hyp.11074](https://doi.org/10.1002/hyp.11074).

groundwater in Eastern Russia (XXI conference on groundwater in Siberia and Far East with international participation) «Fundamental and applied problems in hydrogeology». (Yakutsk, June 22–28, 2015). Yakutsk, Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press, 2015, pp. 352–355.

Shepelev V.V. *Nadmerzlotnye vody kriolitozony* [Suprapermafrost waters in the cryolithozone]. Novosibirsk, Publ. Geo, 2011. 169 p. (In Russian).

Sorokina A.T. *Gidrogeologicheskie struktury Priamur'ya, ikh evolyutsiya i flyuidnyi rezhim* [Hydrogeological structures at the Amur region, their evolution and fluid conditions]. *Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology]*, 1992, vol. 11, iss. 3, pp. 123–133. (In Russian).

Sorokina A.T. Rol' razlomov v formirovani obvodnyonnykh zon Aldanskoj gidrogeologicheskoy oblasti [The role of faults in the formation of inundated zones within the Baikal-Aldan hydrogeological fold region]. *Tikhookeanskaya geologiya [Pacific Geology]*, 2006, vol. 25, iss. 6, pp. 57–66. (In Russian; abstract in English).

Stepanov V.M. *Vvedenie v strukturnuyu gidrogeologiyu [Introduction in structural hydrogeology]*. Moscow, Publ. Nedra, 1989. 229 p. (In Russian).

Suzuki M., Inagaki H., Ueno S., Ujihara M., Ohno H., Ogawa K., Goto S., Nakamura Y., Hara S., Mima K. Large-scale slope failures and their mechanism due to heavy rainfall by Typhoon No.12 in 2011 in the Kii Peninsula of Japan. *Proceedings of the 6th Civil Engineering Conference in the Asian Region (CECAR6) «Embracing the Future through Sustainability»* (Jakarta, Indonesia, 20-22 August, 2013). P. 35–42.

Tarbeeva A.M., Gartsman B.I. Morfogenez pervichnykh zven'ev gidrograficheskoi seti: naturnye issledovaniya v Tsentral'nom Sikhote-Aline [Morphogenesis of primary components of the hydrographic network: field investigations in central Sikhote-Alin]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]*, 2017, iss. 4, pp. 114–121. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-4\(114-121\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-4(114-121)). (In Russian; abstract in English).

Timofeev D.A. *Terminologiya denudatsii i sklonov [Denudation and slope terminology]*. Moscow, Publ. Nauka, 1978. 242 p. (In Russian).

Trias i yura Sikhote-Alinya. Kniga 1. Terrigennyi kompleks [Triassic and Jurassic of the Sikhote-Alin. Book 1. Terrigenous assemblage]. Vladivostok, Publ. Dalnauka, 2004. 417 p. (In Russian; abstract in English).

Tyurin A.I., Romanovskii N.N., Poltev N.F. *Merzlotno-fatsial'nyi analiz kurumov [Permafrost facies analysis of kurums]*. Moscow, Publ. Nauka, 1982. 150 p. (In Russian).

Uchida T., van Meerveld I., McDonnell J.J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response. *Journal of Hydrology*, 2005, vol. 311, iss. 1–4, pp. 117–133. DOI: [10.1016/J.JHYDROL.2005.01.012](https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2005.01.012).

Uhlenbrook S. Catchment hydrology – a science in which all processes are preferential. *Hydrological Processes*, 2006, vol. 20, iss. 16, pp. 3581–3585. DOI: [10.1002/hyp.6564](https://doi.org/10.1002/hyp.6564).

Umarova A.B. *Preimushchestvennye potoki vlagi v pochvakh: zakonomernosti formirovaniya i znachenie v funktsionirovanii pochv [Preferential flow in soils: formation regularity and significance in soil functioning]*. Moscow, Publ. GEOS, 2011. 266 p. (In Russian; abstract in English).

Vasilenko N.G. *Gidrologiya rek zony BAM: ekspeditsionnye issledovaniya [Hydrology of the BAM Zone Rivers: Field Researchers]*. St. Petersburg, Publ. Nestor-Historia, 2013. 672 p. (In Russian; abstract in English).

Vinogradov Yu.B. *Voprosy gidrologii dozhdevykh pavodkov na malykh vodosborakh Sredney Azii i Yuzhnogo Kazakhstana [Discussions on hydrology of rain floods at small watersheds in Middle Asia and South Kazakhstan]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1967. 262 p. (In Russian).

Weiler M. Macropores and preferential flow – a love-hate relationship. *Hydrological Processes*, 2017, vol. 31, iss. 1, pp. 15–19. DOI: [10.1002/hyp.11074](https://doi.org/10.1002/hyp.11074).

Zakharov V.S., Simonov D.A., Gilmanova G.Z., Didenko A.N. The fractal geometry of the river network and neotectonics of south Sikhote-Alin.

- Russian Journal of Pacific Geology*, 2020, vol. 14, iss. 6, pp. 526–541. DOI: [10.1134/S181971402006007X](https://doi.org/10.1134/S181971402006007X). (Russ. ed.: Zakharov V.S., Simonov D.A., Gil'manova G.Z., Didenko A.N. Fraktal'naya geometriya rechnoi seti i neotektonika yuzhnogo Sikhote-Alinya. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2020, vol. 39, iss. 6, pp. 48–64. DOI: [10.30911/0207-4028-2020-39-6-48-64](https://doi.org/10.30911/0207-4028-2020-39-6-48-64)).
- Zhil'nikov V.N. *Rukovodstvo po metodike opredeleniya fil'tratsionno-suffuzionnykh svoystv skal'nykh osnovanii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii* [Guidelines for the methodology for determining the filtration-suffusion properties of rocky bases of hydraulic constructions]. Leningrad, Publ. Energiya, 1975, 75 p. (In Russian).
- Zhil'tsov A.S. *Gidrologicheskaya rol' gornykh khvoino-shirokolistvennykh lesov Yuzhnogo Primor'ya* [Hydrological role of mountain coniferous-broad-leaved forests of the Southern Primorye]. Vladivostok, Publ. Dal'nauka, 2008. 332 p. (In Russian).