УДК 556.51, 911.52 DOI: 10.15853/2072-8212.2017.46.51-65

СВЯЗЬ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОСБОРОВ И ЛАНДШАФТНЫХ УСЛОВИЙ В БАССЕЙНЕ Р. АВАЧИ (КАМЧАТКА) С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СРЕДНЕГОДОВОГО И МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК

П.Н. Терский, К.К. Жбаков, А.И. Михеева

Мл. н. с., к. г. н.; студент; н. с., к. г. н.; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991 Москва, Ленинские горы, ГСП-1, Географический факультет
Тел.: +7 926 433 5332. E-mail: pavel_tersky@mail.ru

РЕКА АВАЧА, РЕЧНОЙ СТОК, ЛАНДШАФТ, РАСХОД ВОДЫ, СТОКОФОРМИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ, ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

Статья посвящена исследованию факторов формирования речного стока в бассейне р. Авачи (Восточная Камчатка), в частности, ландшафтного фактора. В условиях крайне слабой метеорологической изученности актуальным средством является использование материалов сети гидрологических наблюдений и дистанционных методов с применением технологий пространственного анализа. На первом этапе исследования была создана ГИС, содержащая полную базу картографических материалов, результатов полевых работ и данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), результаты расчета морфометрических характеристик рек бассейна, а также создана актуальная ландшафтная карта на территорию бассейна р. Авачи. На втором этапе оценивалась степень влияния морфометрических характеристик и распределения различных ландшафтов на формирование среднего и максимального стока с использованием актуализированной гидрологической информации. На третьем этапе проведен анализ влияния комплекса стокоформирующих факторов на максимальный сток половодья и паводков на основе уравнений линейной регрессии. Выявлено, что пространственное распределение ландшафтов влияет на формирование стока в западной части бассейна, в то время как для восточной части наиболее значимым фактором формирования стока является рельеф.

THE CORRELATION BETWEEN MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS, LANDSCAPE DRIVERS OF FLOW GENERATION AND THE CHARACTERISTICS OF MAXIMUM AND MEAN ANNUAL RIVER FLOW IN THE AVACHA RIVER CATCHMENT (KAMCHATKA)

Pavel N. Terskii, Kirill K. Zhbakov, Anna I. Mikheeva

Researcher, Ph. D. (Geography); Student; Researcher, Ph. D. (Geography); Lomonosov Moscow State University
119991 Moscow, Leninskie Gori, GSP-1, Faculty of Geography
Tel.: +7 926 433 5332. E-mail: pavel_tersky@mail.ru

AVACHA RIVER, RIVER RUNOFF, LANDSCAPE, WATER FLOW, STREAMFLOW GENERATION DRIVERS, SPATIAL ANALYSIS

The study was to investigate the flow generation drivers and a landscape driver in particular in the basin of Avacha River (East Kamchatka). In terms of poor meteorological information the actual instrument in the study was analysis of the hydrometeo monitoring data and using methods of remote sensing. First, we created a GIS which included published maps, field data Earth remote sensing (ERS) data and morphometric derivations for the Avacha basin area. We also made actual landscape map for the territory of the Avacha river basin. Our next step was estimation of the effects of morphometric characteristics and distribution of different landscapes on formation of mean and maximum flows on the base of updated hydrological data. In the third step we analyzed effects of the complex of runoff forming factors in the maximum flow during flood periods on the base of the formula of linear regression. It has been revealed, that the spatial distribution of certain landscapes has significant effect in the flow generation in western part of the basin, whereas the relief (morphometrical parameters) was the most contributing factor in the eastern part.

Для Камчатского края, особенно его юго-восточной части, характерны богатство и разнообразие водных ресурсов, а также развитость опасных гидрологических процессов. Их интенсивность и продолжительность определяются водным режимом рек. Относительно небольшой по площади водосбор р. Авачи (5090 км^2) полизонален и имеет очень высокий годовой (28,5 л/с*км^2) и максимальный модуль стока (162 л/с*км^2). Резкое увеличение расходов воды в весенне-летний период снеготаяния приводит к интенсификации опасных русловых процессов и затоплению прибрежных территорий в нижней части бассейна р. Авачи. В период прохождения пика половодья (июнь) негативное воздействие вод (затопление прибрежных территорий и опасные русловые процессы) отмечается на территории г. Елизово, в поселках Раздольный, Коряки, Северные Коряки, в которых страдают

жилая застройка и прилегающие территории. Исследование режима максимального стока р. Авачи актуально для водопользователей и административного аппарата в связи с широким развитием опасных процессов.

Сток на водосборе р. Авачи формируется из атмосферных осадков (жидких и твердых), но их изученность крайне слабая вследствие слаборазвитой сети метеонаблюдений, особенно в горных районах (Ресурсы.., 1973).

Ландшафтный фактор формирования стока отражает влияние подстилающей поверхности на трансформацию осадков в сток и включает в себя геологическое строение и гидрогеологическую структуру водосбора, почвы, растительность, а также факторы рельефа — экспозицию склонов, среднюю высоту и уклон бассейна.

Попытки получения косвенных методов расчета величин стока для неизученных рек Камчатки предпринимались в разное время несколькими исследователями (Васьковский, 1960; Евдотьев, 1970, 1971). Вопросы, связанные с гидрологией рек Камчатского полуострова, освещены во многих публикациях (Горин, Терский, 2005; Опасные русловые процессы.., 2014; Куксина, Чалов, 2012). Однако в этих работах расширенный анализ степени влияния конкретных ландшафтов на речной сток не проводился.

Цель настоящей работы — провести ландшафтно-гидрологический анализ и изучить влияние факторов рельефа и ландшафтной структуры водосбора на формирование стока реки Авачи и ее притоков, опираясь на современные фондовые и опубликованные данные, материалы полевых исследований, данных дистанционного зондирования и результаты обработки рядов гидрологической информации. Закономерности, полученные в работе, могут служить основой для расчетов и прогнозов гидрологических процессов в бассейне р. Авачи, а также других водосборов со сложной ландшафтной структурой.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

В исследовании использованы четыре массива исходной информации.

Данные гидрологических наблюдений на сетевых водомерных постах Камчатского УГМС, опубликованные в изданиях Государственного водного кадастра (Государственный водный кадастр, 1960–1989), полученные авторами в Камчатском УГМС, а также приведенные в открытом доступе данные гидрологических наблюдений за 2008–2012 гг. (https://gmvo.skniivh.ru). Для характеристики стока и его распределения по территории бассейна в работе рассматривается модуль годового и максимального стока, значения которого рассчитаны на основе рядов среднесуточных расходов воды. Были использованы ряды данных о стоке с начала наблюдений до 2012 г. включительно.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ):

– глобальная цифровая модель рельефа Shuttle Radar Topography Mission (SRTM v.2), находящаяся в открытом доступе на электронном ресурсе (USGS, Shuttle Radar Topography Mission: [сайт]. URL: http://glcf.umd.edu/data/srtm/);

– многозональный космический снимок Landsat OLI (от 09.09.2013) (U.S. Geological Survey (USGS) [сайт]. URL: https://earthexplorer.usgs.gov/).

Материалы полевых геоботанических описаний и полевого дешифрирования растительности. В течение полевого сезона 2013 года были сделаны геоботанические описания на 45 площадках, занятых различными типичными растительными сообществами; суммарная протяженность маршрутов — около 200 км; площадь, охваченная визуальными наблюдениями — около 90 км^2 (рис. 1).

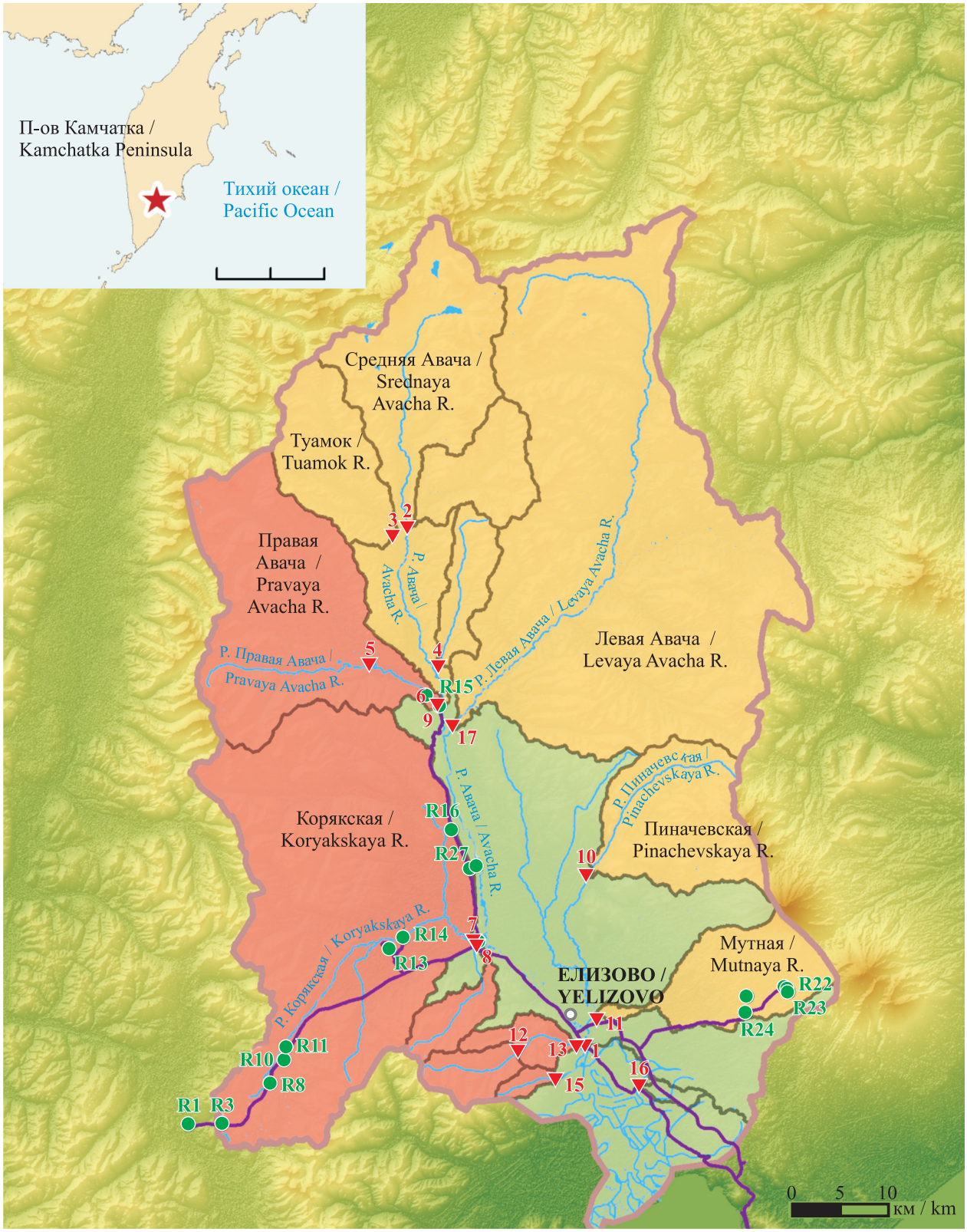
Фондовые данные:

– литературные источники и опубликованные данные гидрологических наблюдений и обобщений;

– топографические карты масштаба 1:500 000 и 1:200 000, находящиеся в открытом доступе;

– тематические карты (карта геоботанического районирования СССР масштаба 1:500 000, геоморфологическая карта Камчатской области масштаба 1:500 000) из архива Территориального фонда геологической информации по Дальневосточному федеральному округу, карта геоботанического районирования Камчатки (Нешатаева, 2011).

Исследование связи стока с ландшафтной структурой водосбора представляет собой «ландшафтно-гидрологический анализ», который, в соответствии с подходом Антипова (Антипов, Федоров, 2000), включает в себя два блока — «ландшафтный» и «гидрологический». «Ландшафтный» включает в себя создание детальной и актуальной ландшафтной карты бассейна р. Авачи



Условные обозначения / Legend

Граница бассейна р. Авачи /
The boundary of the Avacha River basin

Восточная часть бассейна р. Авачи /
The eastern part of the basin

Западная часть бассейна р. Авачи /
The western part of the basin

▼ 1 Гидрологические посты с номерами /
The hydrological gauging stations numbered

● R1 Точки комплексных описаний 2013 г. /
The points of the complex descriptions in 2013

Маршруты полевого обследования 2013 г. /
The trajectories of the field research in 2013

Рис. 1. Карта-схема территории исследования
Fig. 1. The schematic map of the research area

(масштаба 1:200 000). «Гидрологический» блок состоит в расчете среднего и максимального стока. Далее были исследованы связи модулей стока с факторами рельефа (абсолютной высотой, экспозицией и крутизной склонов) и ландшафтным фактором (соотношение площадей различных ландшафтов и площади водосбора) (рис. 2).

В основе создания карты лежат общие принципы ландшафтного картографирования (Николаев, 1978), методы автоматизированного дешифрирования космических снимков и ГИС-анализ. В среде ArcGIS Desktop были созданы тематические слои, содержащие информацию о рельефе, геоморфологическом районировании, растительности и хозяйственном использовании территории.

Архивные тематические карты (геоморфологическое районирование и геоботаническое районирование) были предварительно привязаны и векторизованы. Слой основных типов растительности был создан путем автоматизированной классификации многозонального снимка Landsat OLI по методу максимального правдоподобия (Книжников и др., 2011). Эталонами для данной классификации послужили «ключевые» участки, имеющие геоботанические описания, дополненные данными мелкомасштабной карты геоботанических районов Камчатки В.Ю. Нешатаевой (Нешатаева, 2011).

Все тематические данные на территорию водосбора были интегрированы в базе геоданных в нескольких тематических блоках: 1) «рельеф» (SRTM (USGS, 2004), карты углов наклона и экспозиции склонов), 2) «геоморфология» (векторизованная карта геоморфологических районов), 3) «растительность» (результат пространственного анализа фондовых (Нешатаева, 2011) и натурных данных).

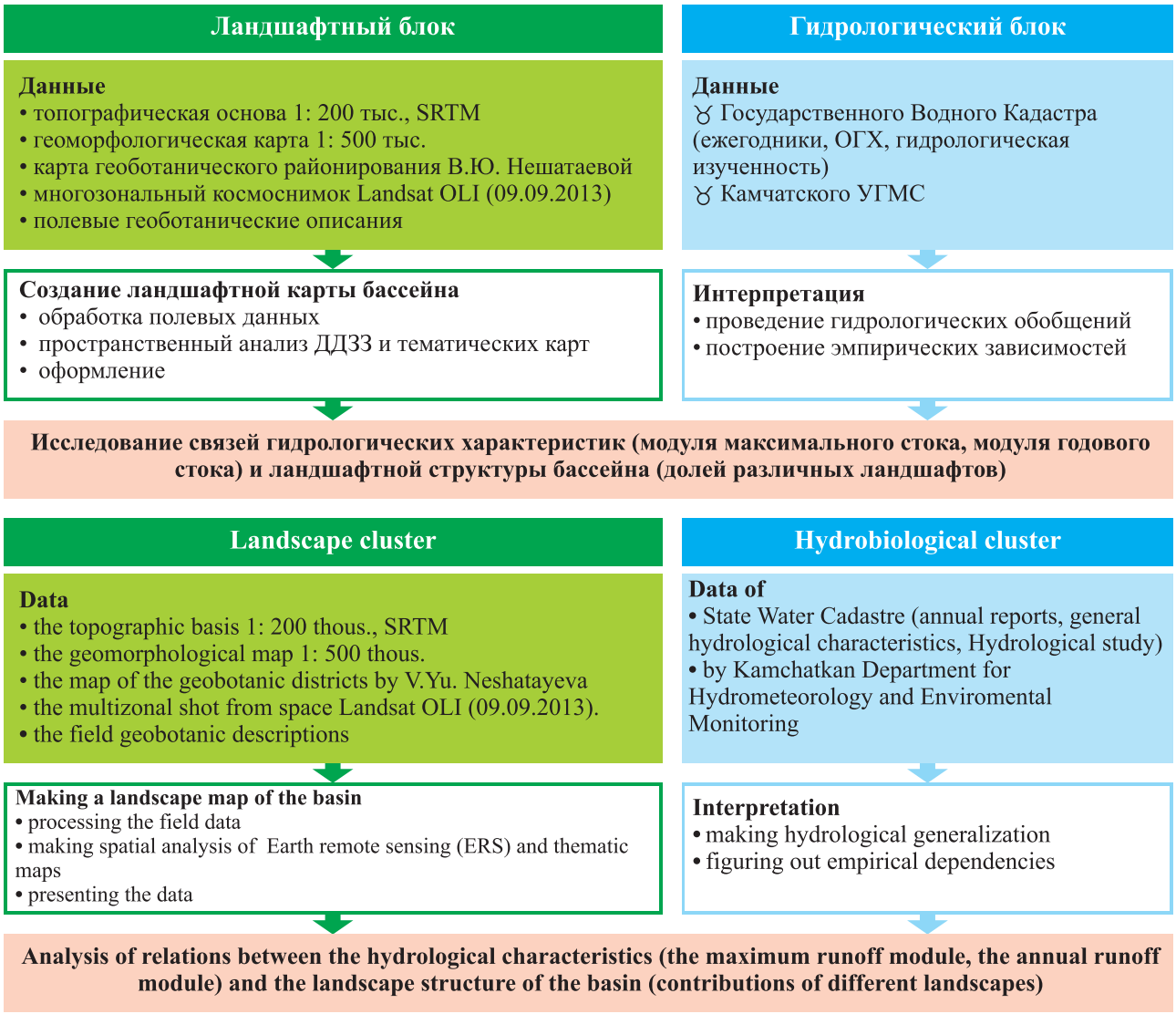


Рис. 2. Схема ландшафтно-гидрологического анализа водосбора р. Авачи
Fig. 2. The scheme of landscape-hydrological analysis of the Avacha River basin

Легенда ландшафтной карты была создана на основе главных выделов карты геоботанического районирования с учетом ландшафтного аспекта распространения разных типов растительности.

Далее все тематические данные из блоков базы геоданных были совместно проанализированы и сгруппированы в соответствии с выделами ландшафтной легенды. Это было реализовано путем создания решающих правил и экспертной классификации (Ларичев, Нарыжный, 1996). Решающие правила определяли границы ландшафтов согласно заданным критериям: абсолютная высота, крутизна, геоморфологический район, класс растительности. Экспертная классификация представляла собой одновременное применение решающих правил ко всем тематическим данным и исключение логических и пространственных противоречий. Верификация результатов классификации проводилась визуально, с использованием карты В.Ю. Нешатаевой и исходного космического снимка. Общая схема создания ландшафтной карты представлена на рис. 3.

Связи стока с долями ландшафта на водосборе оценивались путем расчета коэффициента корреляции (R) для трех ландшафтов (водоразделы, склоны и дельты) и трех выделенных подкатегорий ландшафтов склонов, так как площади остальных незначительны и распространены не повсеместно (рис. 1).

Оценка статистической значимости трендов годового стока проводилась по критерию ранговой корреляции Спирмена с уровнем значимости 5% (Христофоров, 1994).

При построении уравнений линейной регрессии в данной работе оценка значимости отдельных факторов не проводилась, факторы рельефа и ландшафтов приняты условно независимыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ландшафтная карта была оформлена в соответствии с (Ландшафтная карта.., 1988) (рис. 4), ее легенда приведена в табл. 1.

На втором этапе исследования были рассчитаны модули годового и максимального стока по данным 15 гидрологических постов (рис. 1) за весь период наблюдений до 2012 г. (табл. 2).

Повышенный максимальный сток наблюдается в юго-западной части бассейна (р. Половинка, Гаванка, Хуторская). Отдельные притоки р. Авачи (р. Схасык, Мутная) имеют пониженную величину стока за половодье, что объясняется широким распространением в их бассейнах пористых вулканогенных пород (Ресурсы.., 1973). Статистический анализ показал отсутствие значимых трендов в максимальном стоке половодья в период наблюдений, за исключением р. Хуторской (тренд отрицательный).

На третьем этапе исследования была выявлена степень влияния различных ландшафтов на формирование стока. Для этого были оценены связи модулей годового и максимального стока с а) абсолютной высотой, б) уклоном водосборов, в) площадью различных типов ландшафтов водосбора.

В целом, в бассейне р. Авачи правобережные притоки имеют больший сток, чем левобережные. Западная часть бассейна расположена на наветренном склоне хр. Ганальские Востряки, тогда как территория восточного района защищена от влажных воздушных масс Авачинской группой вулканов.

Зависимость между площадью бассейна и максимальным модулем стока имеет вид отрицательной степенной функции: $M_{макс} = 717*F^{-0,158}$ ($M_{макс}$ — максимальный модуль стока, л/км^2*с; F — площадь бассейна, км^2) — и проявляется слабо (коэф-

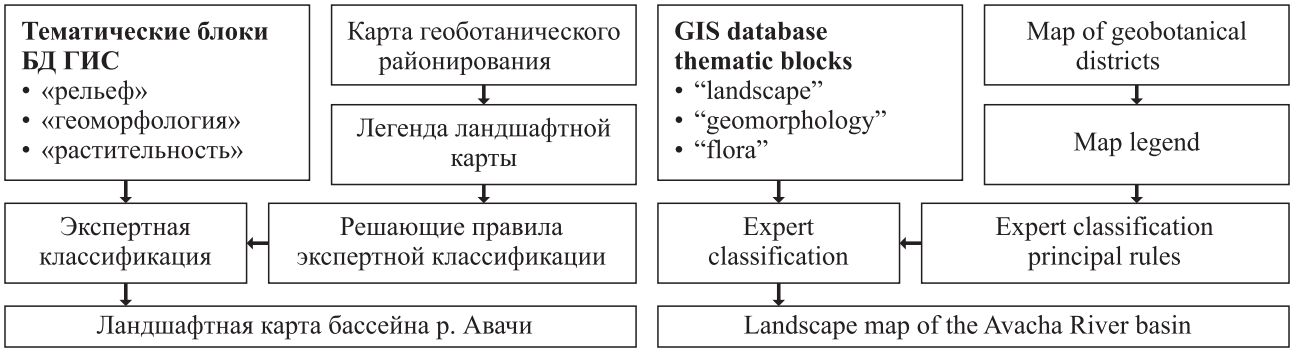


Рис. 3. Схема создания ландшафтной карты бассейна р. Авачи
Fig. 3. The algorythm of making the landscape map of the Avacha River basin

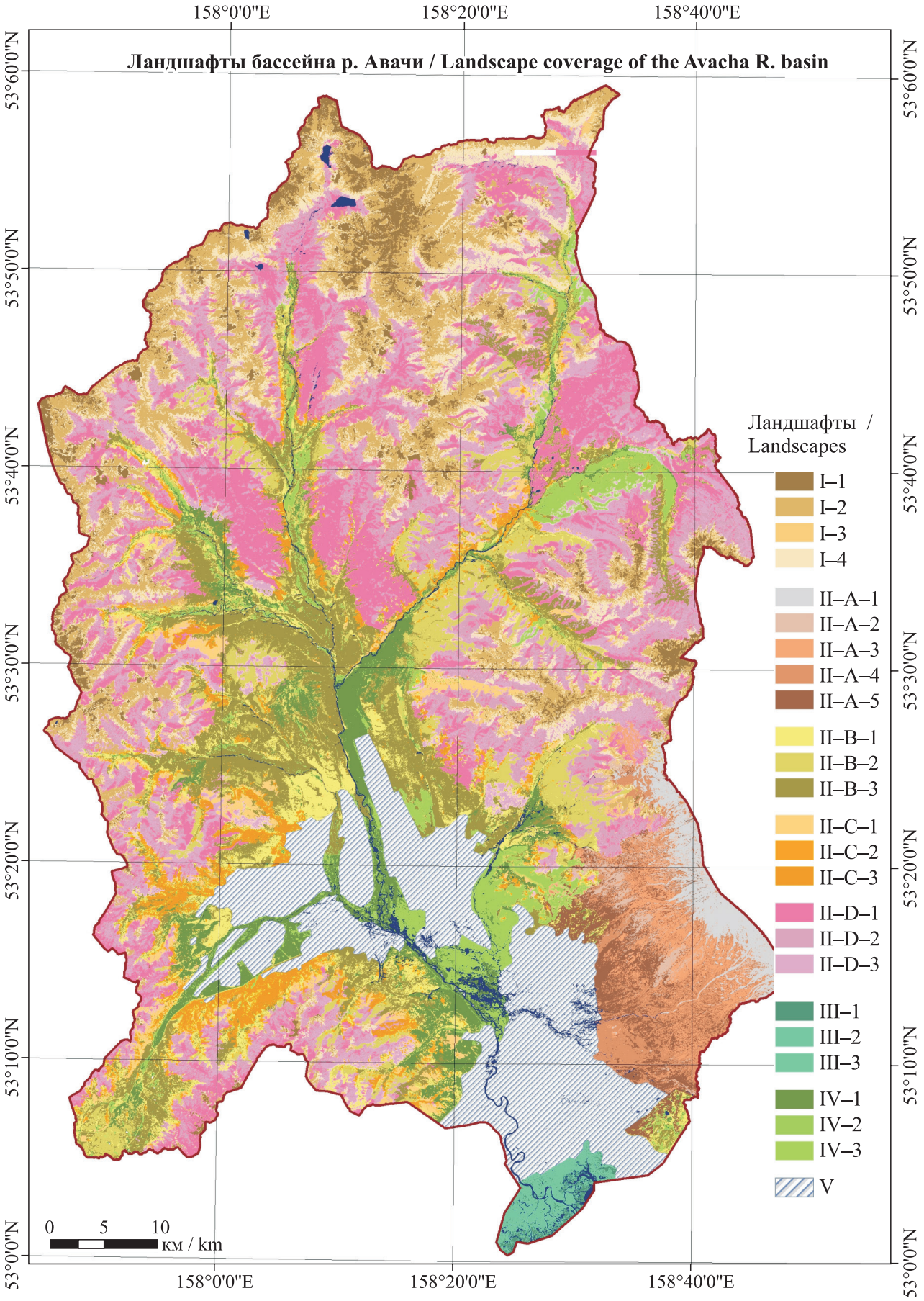


Рис. 4. Карта ландшафтов бассейна р. Авачи с фрагментом легенды
Fig. 4. The landscape map of the Avacha River basin with a fragment of legend

Таблица 1. Легенда ландшафтной карты бассейна р. Авачи
Table 1. The legend for the landscape map of the Avacha River basin

Тип Type	Название типа ландшафта The type of landscape
I	**Водоразделы гребневидные, а также разной степени сглаженности** **The ridge-type boundary between the catchement areas**
I-1	Лишенные сомкнутой растительности и занятые серийными сообществами и пионерными группировками участки нивальных лужаек близ снежников на свежих вулканических отложениях (пепловых, шлаковых и лавовых полей) With rare crown, occupied by serial communities or pioneer groupings, plots of niwal lawns near snowfields on fresh volcanic substrates (ashy, slagy or lava fields)
I-2	Покрытые горными кустарничковыми и кустарничково-лишайниковыми тундрами с участием: *Vaccinium uliginosum, V. vulcanorum, V. minus, Empetrum nigrum, Phyllodoce caerulea, Cassiope lycopodioides, Dryas punctata, Diapensia obovata* и кустистых лишайников (*Cladonia arbuscula, C. rangiferina, Cetraria laevigata, C. nivalis, Stereocaulon alpinum, S. paschale*) Covered by alpine shrubby and shrubby-lichen tundra (*Vaccinium uliginosum, V. vulcanorum, V. minus, Empetrum nigrum, Phyllodoce caerulea, Cassiope lycopodioides, Dryas punctata, Diapensia obovata)* and shrubby lichens (*Cladonia arbuscula, C. rangiferina, Cetraria laevigata, C. nivalis, Stereocaulon alpinum, S. paschale*)
I-3	Покрытые стлаником с преобладанием сосны стланиковой (*Pinus pumila)* и ольхи камчатской (*Alnus kamtschatica)* Covered by elfin wood where elfin cedar (*Pinus pumila)* and Kamchatkan alder (*Alnus kamtschatica)* dominate
I-4	Покрытые сообществами кустарничковых тундр и луговой растительности с редкими деревьями каменной березы (*Betula ermanii*) Covered by communities of shrubby tundra and meadow flora with rare stony berches (*Betula ermanii*)
II	**Склоны / Slopes**
A	**Крутые и средней крутизны склоны крупных стратовулканов и конусов выноса пролювиально-делювиальных шлейфов** **Steep or average slopes of big stratovolcanos or cones of material of proluvial-diluvial plumes**
II-A-1	Лишенные сомкнутой растительности и занятые серийными сообществами и пионерными группировками участки нивальных лужаек близ снежников на свежих вулканических отложениях (пепловых, шлаковых и лавовых полей) With rare crown, occupied by serial communities or pioneer groupings, plots of niwal lawns near snowfields on fresh volcanic substrates (ashy, slagy or lava fields)
II-A-2	Покрытые горными кустарничковыми тундрами с господством водяники (*Empetrum nigrum)* Covered by alpine shrubby tundra with dominance of crowberry (*Empetrum nigrum*)
II-A-3	Под субальпийскими разнотравными лужайками и сообществами рододендрона (*Rhododendron aureum*) Covered by subalpine motley grasses and rhododendron (*Rhododendron aureum*) communities
II-A-4	Покрытые сообществами кустарничковых тундр и луговой растительности, а также каменно-березовыми лесами различной сомкнутости (*Betula ermanii*) Covered by shrubby tundra and meadow vegetation, stony birch (*Betula ermanii*) woods of various density
B	**Склоны речных и озерных долин средней крутизны** **Average slopes of river ot lake valleys**
II-B-1	Покрытые стлаником с преобладанием сосны стланиковой (*Pinus pumila*) и ольхи камчатской (*Alnus kamtschatica*) Covered by elfin woods with dominance of elfin cedar (*Pinus pumila)* and Kamchatkan alder (*Alnus kamtschatica)*
II-B-2	Под субальпийскими разнотравными лужайками и сообществами рододендрона (*Rhododendron aureum*) Covered by subalpine motley lawns and rhododendron (*Rhododendron aureum*) communities
II-B-3	Покрытые каменно-березовыми лесами различной сомкнутости (*Betula ermanii*) covered by stony birch (*Betula ermanii*) woods of various density
C	**Крутые склоны гор, примыкающие к речным долинам, денудационные и денудационно-эрозионные** **Steep alpine slopes adjacent toriver valleys, denudation and denudation-errosion**
II-C-1	Покрытые горными кустарничковыми тундрами с господством водяники (*Empetrum nigrum*) Covered by alpine shrubby tundras with dominance of crowberry (*Empetrum nigrum*)
II-C-2	Покрытые стлаником с преобладанием сосны стланиковой (*Pinus pumila*) и ольхи камчатской (*Alnus kamtschatica*) Covered by elfin woods with dominance of elfin cedar (*Pinus pumila*) and Kamchatkan alder (*Alnus kamtschatica*)
II-C-3	Покрытые сообществами кустарничковых тундр и луговой растительности, а также каменно-березовыми лесами различной сомкнутости (*Betula ermanii*) Covered by shrubby tundra and meadow vegetation, by stony-birch (*Betula ermanii*) woods with various density
D	**Склоны троговых долин различной крутизны и днища трогов, а также увалистые поверхности, созданные комплексной денудацией** **Various slopes of trough valleys or bottom of trough, surfaces produced by complex denudation**
II-D-1	Покрытые горными кустарничковыми тундрами с господством водяники (*Empetrum nigrum*) Covered by alpine shrubby tundras with dominance of crowberry (*Empetrum nigrum*)

Таблица 1. Окончание
The end of the table 1

Тип Type	Название типа ландшафта The type of landscape
II-D-2	Покрытые стлаником с преобладанием сосны стланиковой (*Pinus pumila)* и ольхи камчатской (*Alnus kamtschatica*) Covered by elfin woods with dominance of elfin cedar (*Pinus pumila*) and Lamchatkan alder (*Alnus kamtschatica*)
II-D-3	Покрытые сообществами кустарничковых тундр и луговой растительности, а также каменно-березовыми лесами различной сомкнутости (*Betula ermanii*) Covered by shrubby tundra and meadow vegetation, stony- birch woods of various density (*Betula ermanii*)
III	**Дельты, аллювиально-морские, прибрежно-морские равнины и абразионные террасы** **Estuaries, alluvial-marine, coastal-marine plains and abrasion terrases**
III-1	Занятые осоково-гипново-сфагновыми грядово-мочажинными болотами и травяно-сфагново-гипновыми (аапа) болотами Occupied by sedge-hypnoid-sphagnum ridge-hollow and grass-sphagnum-hypnoid (aapa) bogs
III-2	Занятые стлаников-гипново-лишайниково-сфагновыми (бугристыми) болотами Occupied by elfin-hypnoid-lichen-spagnum (bumpy) bogs
III-3	Под кустарничковыми тундрами с господством водяники (*Empetrum nigrum*) и приморскими лугами Covered by shrubby tundras with dominance of crowberry (*Empetrum nigrum*) and coastal meadows
IV	**Наземные дельты и аллювиально-пролювиальные днища речных долин, поймы и I надпойменные террасы крупных рек высотою 10–15 м, а также долины с плохо выраженным комплексом нерасчлененных террас** **Inland estuaries and alluvial-proluvial bottoms of river valleys, floodplain and I over floodplain terraces of big rivers with the height 10–15 m, valleys with poor expressed complex of undivided terraces**
IV-1	Занятые сообществами крупнокустарниковых ив (*Salix alaxensis, S. pulchra subsp. parallelinervis*), лесов из ивы удской (*S. udensis*) и ольхи пушистой (*Alnus hirsuta*) с участием тополя (*Populus suaveolens*) Occupied by communities of large-shrubdy willows (*Salix alaxensis, S. pulchra subsp. parallelinervis*), Uda willow (*S. udensis*) and fluffy alder (*Alnus hirsuta*) woods with inclusions of poplar (*Populus suaveolens*)
IV-2	Занятые заболоченными участками (сообщества стлаников-гипново-лишайниково-сфагновых болот) и луговыми сообществами Occupied by soggy plots (communities of elfin-hypnoid-lichen-sphagnum bogs) or meadow vegetation
IV-3	Занятые дренированными местообитаниями с преобладанием луговой растительности и кустарничковых тундр, в основном вороничников (*Empetrum nigrum*) Occupied by draind substrates with dominance of meadow vegetation or shrubby tundra, mostly crowberry (*Empetrum nigrum*)
V	**Антропогенно измененные ландшафты, занятые различными типами застройки и сельско-хозяйственными полями** **Anthropogenically altered landscapes, occupied by various types of development and agricultural fields**

фициент достоверности аппроксимации составляет 0,5). С увеличением площади водосбора максимальный модуль стока уменьшается. В наибольшей степени редукция максимального модуля стока достаточно сильно проявляется при площадях водосбора менее 250 км^2. Зависимость между площадью бассейна и модулем годового стока не проявляется.

а) Связь стока с экспозицией склонов. Связь между характеристиками стока и средней экспозицией склонов имеет линейный вид. При увеличении площади склонов с восточной, юго-восточной экспозиции в бассейне модули стока существенно увеличиваются для максимального стока, но почти не меняются для среднегодового (рис. 5).

б) Связь стока с абсолютной высотой. По характеру связи модуля максимального стока со средней высотой и уклоном водосбора выделяются группы рек западной и восточной части бассейна р. Авачи. Эту закономерность подтверждает исследование Ю.А. Евдотьева, отметившего, что в восточном и западном районах бассейна р. Авачи наблюдается резкое отличие величин максимального стока рек, расположенных в одной и той же высотной зоне. Средние высоты водосборов не отражают влияния рельефа и геологии, а различия в речном стоке связаны с влиянием азональных факторов (Евдотьев, 1971).

Западная часть бассейна р. Авачи включает в себя группу притоков: Правая Авача, Корякская, Половинка и Хуторская. Другая группа рек относится к восточной части: Средняя Авача, Левая Авача, Пиначевская, 1-я Мутная. При увеличении значений средних высот и уклонов модуль максимального и среднегодового стока увеличивается. При прочих равных условиях модули стока восточной части бассейна значительно ниже, чем западной.

Таблица 2. Значения максимальных и средних модулей стока
Table 2. The values of the runoff maximum and mean modules

Река River	Пост Station	Период наблюдений Observation period	Номер поста на карте (рис. 1) Station number on the map (fig. 1)	Площадь, км² Square, km²	Средний годовой модуль стока (л/с*км²) Runoff average annual module (l/sec*km²)	Максимальный модуль стока (л/с*км²) Runoff maximum module (l/sec*km²)
Авача Avacha	Елизово Yelizovo	01.08.1930 – действ. (till now)	1	4685	28,5	162
Падь Сырыцын Syrytsyn Padz	150 м от устья 150 m from the mouth	01.10.1971 – действ. (till now)	2	114	29,9	276
Туамок Tuamok	3 км от устья 3 kms from the mouth	07.04.1960 – действ. (till now)	3	165	32,1	370
Схасык Skhasyk	0,7 км от устья 0,7 kms from the mouth	01.05.1960 – действ. (till now)	4	70	25,5	144
Средняя Авача Srednaya Avacha	З. Дьяконова Dyakonova	25.10.1959 – действ. (till now)	9	795	27,8	194
Правая Авача Pravaya Avacha	200 м выше устья р. Стеновой 200 m upper the mouth, the Stenovaya	07.03.1960 – действ. (till now)	5	119	54,1	647
Правая Авача Pravaya Avacha	З. Дьяконова Dyakonova	25.10.1959 – действ. (till now)	6	458	38,0	380
Левая Авача Levaya Avacha	1,6 км от устья 1,6 km from the mouth	25.01.1960 – действ. (till now)	17	1299	29,6	252
Корякская Koryakskaya	Коряки Koryaki	21.05.1959 – действ. (till now)	7	923	33,2	274
Гаванка Gavanka	Коряки Koryaki	09.06.1961 – действ. (till now)	8	51	15,7	365
Пиначевская The Pinachavskaya	Пиначево Pinachevo	17.10.1961 – действ. (till now)	10	219	30,2	228
1-я Мутная 1st Mutnaya	Пос. Заречный Zarechniy village	01.01.1960 – действ. (till now)	11	162	17,3	200
Половинка Polovinka	13,7 км от устья 13,7 kms from the mouth	20.11.1969 – действ. (till now)	12	49	46,8	546
Половинка Polovinka	Елизово Yelizovo	14.05.1958 – действ. (till now)	13	88	33,6	481
Хуторская Khutorskaya	Пограничный Pogranichniy	01.01.1964 – действ. (till now)	15	14	30,8	428
Красная Krasnaya	Краснореченск Krasnorechensk	17.09.1963 – действ. (till now)	16	11,4	31,9	605

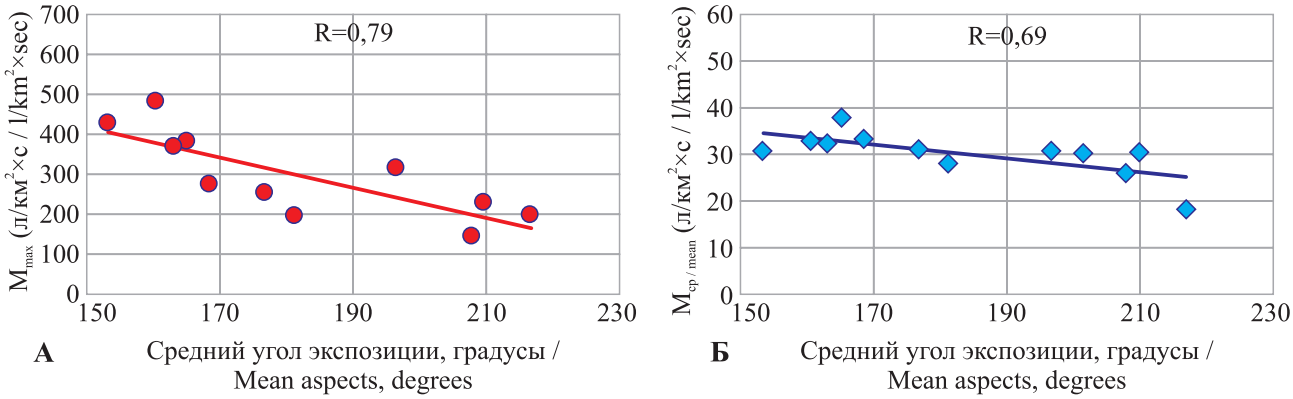


Рис. 5. Графики зависимости между средним углом экспозицией склонов бассейнов и максимальными (А) и средними модулями стока (Б)
Fig. 5. The correlation plot between slope mean aspects of the basins and the maximum (A) and mean (Б) flow modules

С увеличением средней высоты и уклона водосбора среднегодовой и максимальный модуль стока линейно увеличивается как в западной, так и в восточной части бассейна р. Авачи (рис. 6).

В градиентах модуля годового стока ($M_{ср}$) для рек восточной и западной части бассейна значительных различий не выявлено (табл. 3). Градиент увеличения максимального ($M_{макс}$) модуля стока при увеличении средних высот водосборов западной части значительно меньше, чем восточной. Вероятно, это связано с тем, что в восточной части абсолютные высоты в целом больше (есть реки со средней высотой водосбора более 800 м), а величины самих модулей стока меньше, чем в западной.

в) Связь стока с уклоном водосбора. Уклон водосбора напрямую влияет на максимальный и среднегодовой сток. Увеличение уклона территории в общем приводит к уменьшению аккумуляции осадков в подземных водах, следовательно, увеличивается как среднегодовой, так и максимальный сток (рис. 7).

Для максимального стока коэффициент достоверности аппроксимации связи (R) максимального стока восточной части и уклона склонов невелик: 0,7. В западной части бассейна увеличение $M_{макс}$ и $M_{ср}$ при увеличении уклона существенно выше, чем в восточной (табл. 4). То есть в более высокогорных восточных районах формирование поверхностного стока менее чувствительно к увеличению крутизны склонов.

г) Связь стока с площадями преобладающих ландшафтов. Ландшафты представляют собой интегральный фактор формирования стока, который содержит в себе геологическое строение, высоту, уклон и экспозицию склонов, растительный покров, почвы и др.

Различия в распространении ландшафтов I типа (см. табл. 1), представленных гребневидными водоразделами, практически не отражаются на максимальном и годовом стоке.

Другая картина наблюдается для ландшафтов II типа, представленных склонами (рис. 8). Связь максимального и годового стока рек бассейна Авачи с долей подкатегорий ландшафтов II-B и II-C (табл. 1) носит характер возрастающей зависимости. Для склонов речных и озерных долин средней крутизны (II-B) связь характеризуется R = 0,80 и R = 0,73 соответственно. Наиболее сильное влияние на сток по данным корреляционного анализа характерно для крутых склонов гор, примыкающих к речным долинам II-C (R = 0,79 для макси-

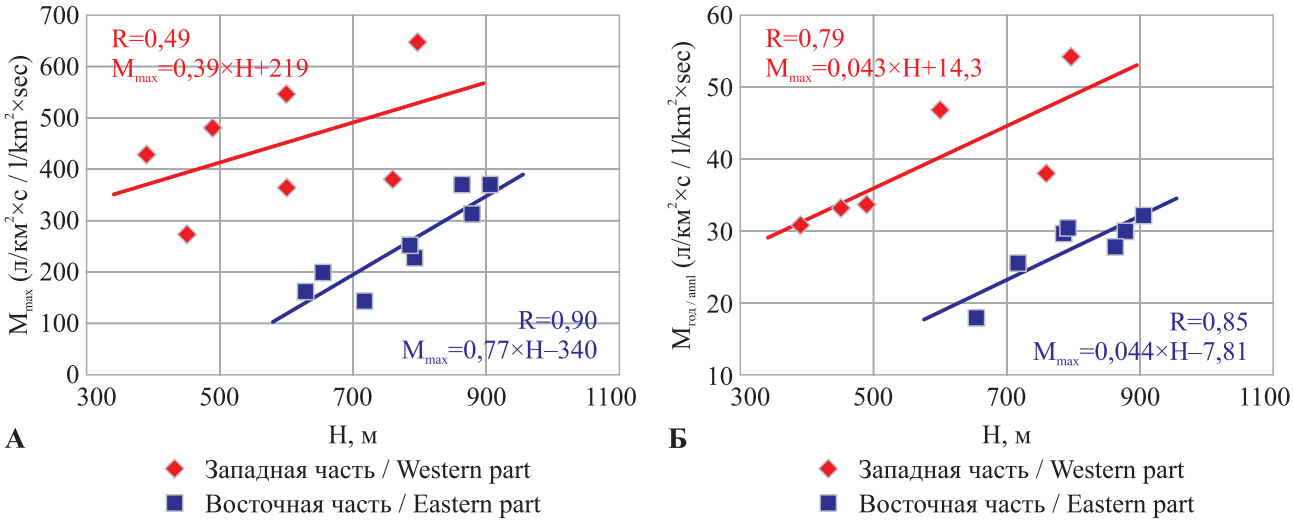


Рис. 6. Графики связи между средними высотами водосборов западной и восточной части бассейна р. Авачи с модулями максимального стока (А) и модулями годового стока (Б)
Fig. 6. The correlation plot between the average catchment elevation in the western and eastern parts of the Avacha River basin and the maximum (A) and mean (Б) annual flow modules

Таблица 3. Высотный градиент модуля стока для рек бассейна р. Авачи
Table 3. The height gradient of the flow module for streams in the Avacha River basin

Градиент Gradient	Западная часть Western part	Восточная часть Eastern part
$M_{макс}$, л/км²*с на 100 м M_{max}, l/km²*sec per 100 m	38,9	76,5
$M_{ср}$, л/км²*с на 100 м M_{mean}, l/km²*sec per 100 m	4,32	4,43

мального и 0,89 для среднегодового модулей стока). При этом территория, занимаемая данным ландшафтом во всем бассейне р. Авачи, невелика (5%). Это говорит о том, что в общем случае данный ландшафт оказывает заметное влияние на сток малых рек, представляющих собой верхние звенья речной сети, где он занимает существенную площадь.

Воздействие склонов троговых долин (II-D) на формирование стока проявляется достаточно сильно на севере бассейна и носит характер убывающей зависимости (при увеличении доли площади склонов троговых долин сток уменьшается). R достигает значений 0,74 для максимального и 0,71 для среднегодового модулей стока. В высокогорных бассейнах северной части высокая доля склонов троговых долин, которые в наибольшей степени участвуют в трансформации талых вод, снижает как годовой, так и максимальный сток.

Отмечается слабая связь годового стока с ландшафтом, который представлен наземными дельтами и аллювиально-пролювиальными днищами речных долин, поймами и первыми надпойменными террасами наиболее крупных рек, а также долин с плохо выраженным комплексом нерасчлененных террас (IV). Для максимальных модулей стока R составляет 0,64.

Для остальных типов ландшафтов связи со стоком не выявлены, либо их выявление не представляется корректной задачей из-за их редкой распространенности по территории всего бассейна р. Авачи (<2%) и, как следствие, слишком малого количества водосборов, на территории которых эти ландшафты встречаются.

На основе исследованных зависимостей и фактических данных о речном стоке построен ряд уравнений множественной линейной регрессии, которые разделены на несколько блоков:

По зонам бассейна р. Авачи (рис. 1):

a) весь бассейн

b) восточная часть (левый берег р. Авачи и бассейн р. Средней Авачи)

c) западная часть (правый берег р. Авачи)

1. По определяемым обеспеченностям максимальных модулей речного стока:

a) 1%-я обеспеченность

b) 5%-я обеспеченность

Стокоформирующие факторы, входящие в уравнения регрессии в виде предикторов, разделены на две группы:

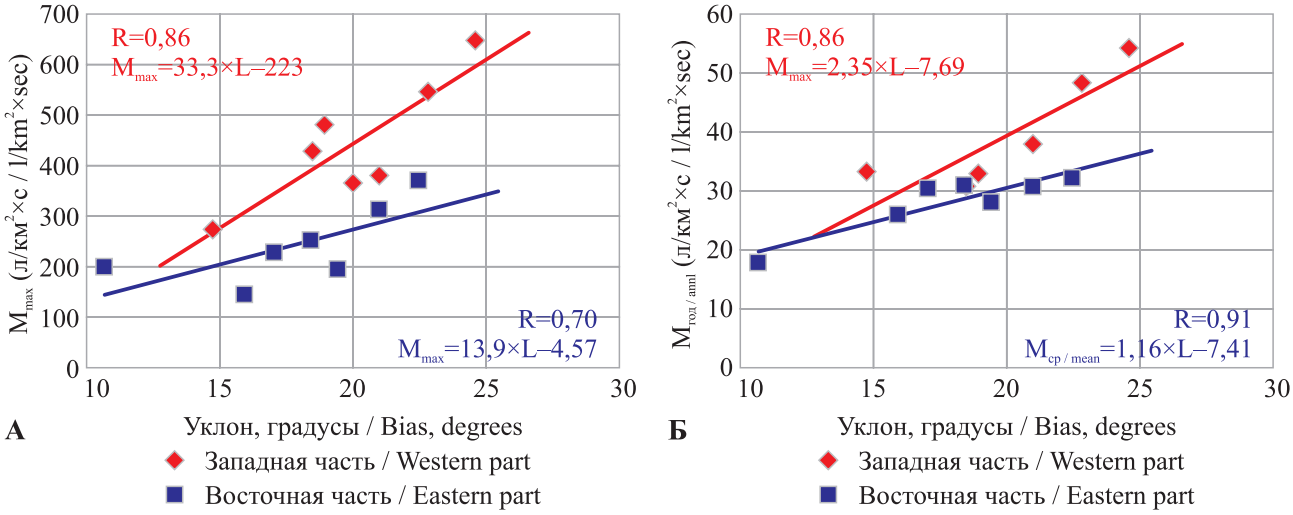


Рис. 7. Графики связи между средними уклонами водосборов западной и восточной части бассейна р. Авачи с модулями максимального стока (А) и модулями годового стока (Б)
Fig. 7. The correlation plot between mean biases of catchment in the western and eastern parts of the Avacha River basin and the maximum (A) and mean (Б) annual flow modules

Таблица 4. Изменение модулей стока с увеличением уклона водосбора
Table 4. The dynamics of the flow module according to catchment slope increase

Градиент модуля стока Flow module gradient	Западная часть Western part	Восточная часть Eastern part
$M_{макс}$, л/км²*с на 1° M_{max}, l/km²*sec per 1°	33,3	13,9
$M_{ср}$, л/км²*с на 1° M_{mean}, l/km²*sec per 1°	2,38	1,16

– в зависимости от морфометрических условий (средняя высота, крутизна и экспозиция склонов);

– в зависимости от ландшафтных условий (доли площадей различных типов ландшафта от площади водосбора).

С целью учета редукции стока в зависимости от площади водосбора, максимальные модули стока были приведены к условной площади 200 км^2 по формуле:

$q'_{200} = q(A/200)^n$

где q — модуль стока, A — площадь бассейн реки, n — показатель степени редукции, равный 0,15 для рек Камчатки (Ресурсы.., 1973).

Для построения регрессионных уравнений в зависимости от ландшафтных условий были применены наиболее распространенные в бассейне р. Авачи ландшафты, а именно: водоразделы (I), склоны (II) и дельты (IV). Для всех регрессионных зависимостей определены коэффициенты множественной корреляции.

Основываясь на результатах проверки зависимостей линейной множественной регрессии (коэффициенты множественной корреляции приведены в табл. 5 и табл. 6), можно дать рекомендации для их применения. Если говорить обо всей площади бассейна р. Авачи, то лучше всего себя проявляет регрессионная зависимость с учетом морфометрических характеристик. Коэффициенты корреляции составили 0,79 для $q'_{200\ 1\%}$ и 0,80 для $q'_{200\ 5\%}$. Для восточной части рекомендуется при-

Таблица 5. Значения коэффициентов множественной корреляции с использованием морфометрических факторов
Table 5. Multiple correlation coefficients with the use of morphometric factors

Максимальный модуль стока Runoff maximum module	Весь бассейн Whole basin	Восточная часть Eastern part	Западная часть Western part
$q'_{200\ 1\%}$	0,78	0,81	0,84
$q'_{200\ 5\%}$	0,80	0,79	0,89

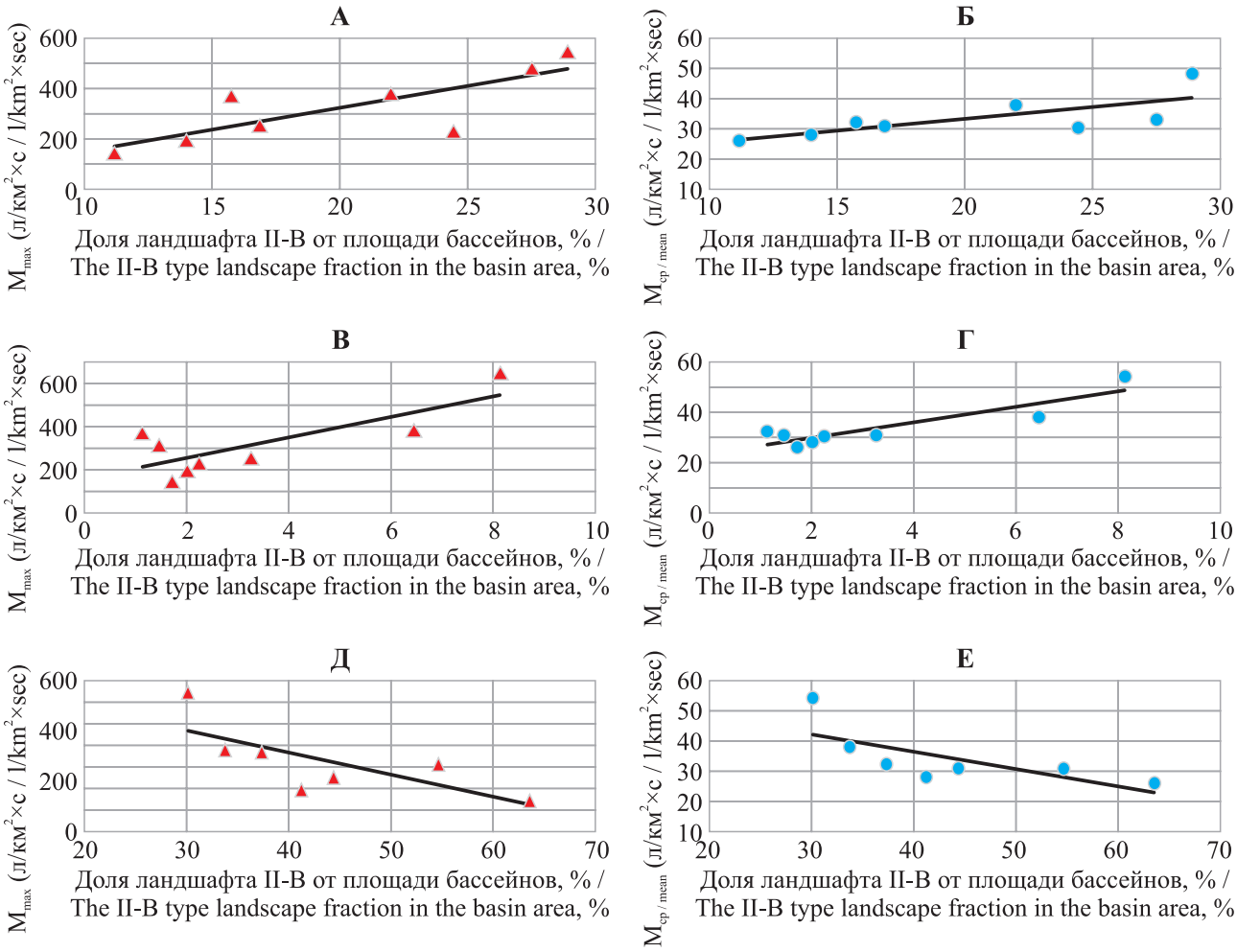


Рис. 8. Графики связи между долями ландшафта II типа с максимальными (А, В, Г) и годовыми (Б, Г, Д) модулями стока
Fig. 8. The correlation plot between the fraction of type II landscape and the maximum (А, В, Г) and annual (Б, Г, Д) flow modules

менять регрессионную зависимость с учетом ландшафтных характеристик. Данную методику следует применять для бассейнов рек, в которых суммарная площадь ландшафтов, используемых в регрессионных уравнениях (I, II, IV), составляет не менее 90% от площади водосбора. Для западной части рекомендуется осуществлять расчет с учетом морфометрических характеристик речных бассейнов. Эти зависимости следует использовать при значениях средней высоты бассейна более 500 м и средней крутизны склонов более 10°. В соответствии с чем в табл. 7 представлены уравнения регрессии, рекомендуемые к использованию для расчета максимальных модулей стока, а также ограничения к их применению. На основе уравнений регрессионных зависимостей для восточной и западной частей (табл. 7), с учетом ограничений были рассчитаны максимальные расходы воды 1%-й и 5%-й обеспеченности (табл. 8) для 18 рек бассейна р. Авачи, не освещенных гидрологическими данными.

Таблица 6. Значения коэффициентов корреляции множественной регрессии с использованием долей ландшафтов
Table 6. The correlation coefficients for the multiple regression with the use of landscape contribution

Максимальный модуль стока Maximum flow	Весь бассейн Whole basin	Восточная часть Eastern part	Западная часть Western part
$q'_{200\ 1\%}$	0,46	0,81	0,82
$q'_{200\ 5\%}$	0,41	0,91	0,83

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного ландшафтно-гидрологического анализа выявлено, что характер связи среднего и максимального стока рек бассейна Авачи со стокоформирующими факторами рельефа (высотой, уклоном) имеет пространственную неоднородность, связанную с преобладающей экспозицией склонов: бассейн делится на западную и восточную части.

С увеличением средней высоты и уклона водосбора среднегодовой и максимальный модуль стока линейно увеличивается. При увеличении площади склонов восточной и юго-восточной экспозиции в бассейне модули стока существенно увеличиваются для максимального стока, но почти не меняются для среднегодового.

В бассейне р. Авачи наибольшее распространение имеют ландшафты склонов долин средней крутизны (II, 68% площади) и ландшафты водоразделов (I, 21%). Связь максимального и годового стока рек бассейна Авачи с долей подкатегорий ландшафтов

Таблица 7. Регрессионные зависимости, рекомендованные для расчета максимального модуля стока приведенного к условной площади 200 км^2
Table 7. The regression equations recommended for calculation of the runoff maximum module per conventional area of 200 km^2

Зоны Zones	$q'_{200\ 1\%}$, л/(км^2*сек) l/(km^2*sec)	$q'_{200\ 5\%}$, л/(км^2*сек) l/(km^2*sec)	Ограничения Limitation
Восточная часть Eastern part	$q'_{200\ 1\%} = 1518 - 8{,}62I - 15{,}2II + 14{,}8IV$	$q'_{200\ 1\%} = 1800 - 12{,}3I - 18{,}6II + 7{,}97IV$	F > 50 км^2 H > 500 м L > 10°
Западная часть Western part	$q'_{200\ 1\%} = 141 + 0{,}46L + 0{,}64H - 0{,}84A$	$q'_{200\ 1\%} = -660 + 9{,}83L + 0{,}19H + 3{,}98A$	F > 15 км^2 H > 500 м L > 10° I + II +IV > 90%
Обозначения Legend	F — Площадь бассейна, км^2 / Square of the basin, km^2 L — Средняя крутизна склонов бассейна / Mean steepness of the basin slopes H — Средняя высота бассейна / Mean height of the basin A — Экспозиция склонов / Slope exposition I — Доля (%) ландшафта «Водоразделы гребневидные, а также разной степени … сглаженности» от площади бассейна / The contribution (%) of the landscape I to the square of the basin II — Доля (%) ландшафта «Склоны» от площади бассейна / The contribution (%) of the landscape II to the square of the basin IV — Доля (%) ландшафта «Наземные дельты и аллювиально-пролювиальные днища речных долин, поймы и I надпойменные террасы крупных рек высотой 10–15 м, а также долины с плохо выраженным комплексом нерасчлененных террас» от площади бассейна / The contribution (%) of the landscape III to the square of the basin		
Примечание Note	Переход от модуля стока для расчетной площади водосбора 200 км^2 (q'_{200}) к модулю стока q для истинной площади F осуществляется по уравнению $q = q'_{200}(200/F)^n$ (n — показатель степени редукции, равный 0,15 для рек Камчатки) The transit from the funoff module for calculated square of the catchment area 200 km^2 (q'_{200}) to the runoff module q for real square F is provided according the formula $q = q'_{200}(200/F)^n$ (n – exponent reduction index, which is 0.15 for the rivers in Kamchatka)		

Таблица 8. Максимальные расходы воды рек бассейна р. Авачи, рассчитанные по регрессионным зависимостям, морфометрические и ландшафтные характеристики бассейнов
Table 8. The maximum river discharges in the Avacha River basin, calculated according to regression correlations, the morphometric and landscape characteristics of the basins

Река River	Площадь, км² Area, km²	Средняя высота, м Mean elevation, m	Средний уклон, град. Mean slope, degree	Экспозиция, град. Aspect, degree	Площадь ландшафтов, км² Contribution of landscapes, km²			$q'_{200,1\%}$, л/(км²*сек) l/(km²*sec)	$q'_{200,5\%}$, л/(км²*сек) l/(km²*sec)	$Q_{1\%}$, м³/с m/sec³	$Q_{5\%}$, м³/с m/sec³
					I	II	IV				
Западная часть / Western part											
Падь Костакан Kostakan Padz	17,5	1217	30,2	150	14,0	3,07	0,00	807	466	20,4	11,8
Руч. Прутяной Prutyanoy Stream	38,2	975	30,1	142	19,4	18,6	0,19	660	386	32,3	18,9
Падь Стеновая Padz Stenovaya	105	897	28,1	155	47,8	49,3	4,47	598	404	69,1	46,7
Без названия (бассейн р. Падь Стеновая) No name (the Stenovaya Padz katchment)	20,4	1035	31,9	163	12,3	7,51	0,00	681	501	19,5	14,4
Бугровая 1-я Bugrovaya 1-st	22,6	528	15,6	160	0,11	22,2	0,28	352	228	11,0	7,15
Без названия (бассейн р. Горелой) No name (the Gorelaya katchment)	30,6	503	19,6	168	0,77	19,7	8,09	331	297	13,4	12,1
Правая Вахталка Pravaya Vakhtalka	130	677	25,8	159	26,3	99,8	3,05	453	354	62,9	49,1
Баранья Baranya	27,8	826	29,7	164	11,2	16,6	0,07	546	441	20,4	16,5
Без названия (бассейн р. Правая Вахталка) No name (the Pravaya Vakhtalka katchment)	32,1	642	24,7	170	2,18	27,8	2,16	420	383	17,8	16,2
Левая Вахталка Levaya Vakhtalka	83,8	528	18,0	161	5,64	74,1	4,03	352	259	33,6	24,7
Восточная часть / Eastern part											
Падь Тимоновская Timonovskaya Padz	67,7	1037	26,1	209	39,1	28,3	0,24	389	314	31,0	25,0
Сарайная Saraynaya	60,2	781	23,1	200	19,0	37,9	3,23	368	282	26,5	20,3
Тимонова Timonova	66,3	761	23,9	178	18,6	47,6	0,12	188	121	14,7	9,48
Кехкуй (Киткой) Kekhkuy (Kitkoy)	188	802	26,1	180	53,8	129	3,80	255	183	48,3	34,8
Падь Таловая Речка Padz Talovaya Rechka	62,6	895	26,0	147	26,3	34,9	1,44	343	265	25,6	19,8
Падь Корнеевская Padz Korneevskaya	69,1	925	28,4	169	34,5	34,4	0,24	337	264	27,3	21,4
Падь Глубокая Padz Glubokaya	89,5	1029	29,8	155	58,9	27,5	3,06	534	446	53,9	45,0

II-B и II-C носит характер возрастающей зависимости. Наиболее сильное влияние на сток по данным корреляционного анализа характерно для крутых склонов гор, примыкающих к речным долинам (II-C). Воздействие склонов троговых долин (II-D) на формирование стока проявляется достаточно сильно на севере бассейна и носит характер убывающей зависимости (при увеличении доли площади склонов троговых долин сток уменьшается).

Для рек бассейна р. Авачи связь модулей среднего и максимального стока с площадью водосбора неоднозначная: факторы рельефа и ландшафтные факторы имеют более существенное значение в формировании максимального и годового стока, чем морфометрические характеристики водосбора.

Построены уравнения множественной линейной регрессии в зависимости от морфометрических и ландшафтных факторов для расчета максимальных модулей стока, приведенных к условной площади 200 км^2 обеспеченностью 1% и 5%. Для восточной части рекомендуется применять регрессионную зависимость с учетом долей ландшафтов, а для западной — с учетом морфометрических характеристик. Назначены ограничения для применения регрессионных зависимостей. На основе полученных зависимостей, морфометрических и ландшафтных характеристик бассейнов, для 18 гидрологически неизученных рек рассчитаны максимальные расходы воды обеспеченностью 1% и 5%.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-05-05515 А, 12-05-31140 мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов РФ (АИС ГМВО) / Сост. и ред. СевКавНИИВХ [Ростов-на-Дону, 2014] [Эл. ресурс]. URL: https://gmvo.skniivh.ru.

Антипов А.Н., Федоров В.Н. 2000. Ландшафтно-гидрологическая организация территории. Новосибирск: СО РАН. 254 с.

Васьковский М.Г. 1960. Типизация рек Камчатки и некоторые вопросы изучения их стока // Тр. ДВ НИГМИ. Вып. 11. С. 130–153.

Горин С.Л., Терский П.Н. 2005. Особенности формирования и изменчивости стока р. Большая–Быстрая (Зап. Камчатка) / Теор. и прикл. вопр. совр. геогр.: Матер. Всерос. молодежн. школы-семинара г. Томск: Дельтаплан. С. 120–121.

Государственный водный кадастр. 1960–1989. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 18. Обнинск: ВНИИ ГМИ МЦД.

Евдотьев Ю.А. 1970. Некоторые вопросы изучения максимального стока половодья в бассейнах рек Авачи и Камчатки // Вопр. географии Камчатки. Вып. 6. С. 37–50.

Евдотьев Ю.А. 1971. Анализ условий формирования и методика расчета максимального и годового стока рек Камчатки. Дис. … канд. геогр. наук. Л.: Гидрометинститут. 131 с.

К*нижников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* 2011. Аэрокосмические методы географических исследований: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. М.: Изд. центр «Академия». Изд. 2-е. 336 с.

Куксина Л.В., Чалов С.Р. 2012. Сток взвешенных наносов рек территорий современного вулканизма Камчатки // География и природные ресурсы. № 1. Новосибирск: Гео. С. 103–110.

Ландшафтная карта СССР. 1988. Общая физико-географическая карта для высших учебных заведений / Ред. А.Г. Исаченко 1:4 000 000. М.: ГУГК. 1 л. (1 карта): многокрас. (Общегеогр. карты РФ).

Ларичев О.И., Нарыжный Е.В. 1996. Компьютерное обучение экспертным правилам в задачах классификации // Научно-техническая информация. Серия 2: «Информационные процессы и системы». № 9. С. 4–9.

Нешатаева В.Ю. 2011. Растительный покров полуострова Камчатка и его геоботаническое районирование // Тр. Карельского научного центра РАН. № 1. С. 3–22.

Николаев В.А. 1978. Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. М.: МГУ. 62 с.

Опасные русловые процессы и среда обитания лососевых рыб на Камчатке. 2014 (Под ред. С.Р. Чалова, В.Н. Лемана, А.С. Чаловой). М.: ВНИРО. 240 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. 1973. Т. 20. Камчатка. Л.: Гидрометеоиздат. 367 с.

Христофоров А.В. 1994. Теория случайных процессов в гидрологии. М.: МГУ. 139 с.

USGS (2004), Shuttle Radar Topography Mission. 1 Arc Second scene, Unfilled Unfinished 2.0. Global Land Cover Facility / University of Maryland [College Park, Maryland, USA, 2004. URL: http://glcf.umd.edu/data/srtm/.

U.S. Geological Survey (USGS), Earth Resources Observation and Science (EROS) Center [Sioux Falls, SD, USA, 2012.] URL: https://earthexplorer.usgs.gov/.