

## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В УСТЬЕ РЕКИ КОЛЫМЫ ЛЕТОМ 2019 ГОДА

Д.В. Магрицкий<sup>1</sup>, Н.Л. Фролова<sup>2</sup>, С.А. Агафонова<sup>3</sup>, В.А. Ефимов<sup>4</sup>, А.Н. Василенко<sup>5</sup>,  
А.А. Сазонов<sup>6</sup>, Л.Е. Ефимова<sup>7</sup>

<sup>1-7</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

<sup>1</sup> *Доц., канд. геогр. наук; e-mail: magdima@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: frolova\_nl@mail.ru*

<sup>3</sup> *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: sv\_ice@list.ru*

<sup>4</sup> *Аспирант; e-mail: roxifixat@yandex.ru*

<sup>5</sup> *Аспирант; e-mail: saiiia24@mail.ru*

<sup>6</sup> *Ст. преп.; e-mail: sazonov.lexa@mail.ru*

<sup>7</sup> *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: ef\_river@mail.ru*

Летом 2019 г., впервые за последние 60 лет, проведено масштабное гидрологическое обследование мало изученного устьевое участка р. Колымы, состоящего из придельтового отрезка и дельты. Программа работ включала измерения скоростей течения в речном потоке, уклонов водной поверхности и глубин, расходов, мутности, температуры и электропроводности воды, съемку местности при помощи БПЛА, отбор проб воды и наносов на химический и другие виды анализа, сбор натуральных данных для калибровки методов дистанционного зондирования. Мониторинг за гидрологическими условиями и прохождением паводков проводился на пяти временных постах. Многие наблюдения были выполнены впервые. Несколько серий измерений расходов воды на 24 створах позволили выяснить характер вдольруслового нарастания стока воды р. Колымы, вклад в него главных притоков и Стадухинской протоки, скоростную структуру потока, современное распределение стока в дельте. Последнее уже не соответствует гидравлическим расчетам конца XX в., поскольку доля Каменной Колымы выросла почти на 10%. В пределах устья выделены две обширные зоны смешения. Первая – на придельтовом отрезке – зона смешения вод главной реки и ее правобережных притоков, вторая – в дельте и на устьевом взморье – речных и морских вод. Воды Омолон и Анюя отличаются от колымских существенно меньшей мутностью (5–15 против 120 мг/л), минерализацией (55–70 и 140–160 мг/л) и основным солевым составом воды. Воды этих притоков более холодные. Их шлейф, несмотря на постепенное перемешивание, прижимается к правому берегу придельтового отрезка русла Колымы и достигает вершины дельты, нарушая тем самым репрезентативность наблюдений на посту Черский, и распространяется дальше. Влияние небольших притоков на температурный режим более сложное. В дельте содержание солей в речных водах увеличивается в сторону моря, но действительно морские воды обнаружены (при тех расходах в реке и ветре с моря, которые фиксировались во время экспедиции) лишь на концевом участке Чукочье протоки. На пространственную изменчивость стока взвешенных наносов влияют разбавление колымских вод омолон-анюйскими, а также продольное снижение уклонов и скоростей течения, распределение по рукавам и протокам, поступление большого объема твердого материала с размываемых берегов, таких как в районе знаменитого Дуванного Яра. С помощью новой седиментационной ловушки, ADCP, турбидиметров и гидрологических зондов получены уникальные данные по распределению взвесей в потоке и их составу.

**Ключевые слова:** дельта, минерализация, температура воды, наносы, зона смешения, сток воды

### ВВЕДЕНИЕ

Устье р. Колымы – одно из наименее изученных в России, хотя река относится к очень большим (площадь водосбора 643 тыс. км<sup>2</sup>). Другой показатель несоответствия объема знаний об устье и его значимости – это величина водного стока, поступающего через устье в Восточно-Сибирское море: в среднем ~125 км<sup>3</sup> воды в год, или почти 58% суммарного притока в море всех речных вод. Одновременно с водами в море выносятся речные взвеси – почти 13 млн т/год [Магрицкий, 2016а], растворенные соли – 3,1 млн т/год [Гидрохимический атлас...,

1990], включая загрязняющие вещества [Геоэкологическое..., 2007; Никаноров и др., 2011], но далеко не все, поскольку устье служит для них барьером. Внушительный тепловой сток нижней Колымы (примерно 4600×10<sup>12</sup> кДж [Магрицкий, 2016б]) оказывает мощное тепляющее влияние не только на долину и дельту реки, но и на морское взморье, на многолетнемерзлые породы берегов.

Последние десятилетия для бассейна р. Колымы и в целом для северо-востока РФ характеризуются серьезными климатически обусловленными и антропогенными изменениями стока и гидрологических

условий. Они, по сути, служат наглядным примером реакции рек криолитозоны на разбалансирование системы «климат – вечная мерзлота – водные объекты» [Веремеева, 2017; Геоэкологическое..., 2007; Магрицкий, 2008, 2016, 2018; Magritsky et al., 2018; Nesterova et al., 2020; Romanovsky et al., 2010]. Во-первых, водные ресурсы реки увеличиваются с середины 1990-х гг., и этот рост уже достиг 15% по сравнению с годами до 1995 г. Это явное следствие естественных изменений температурно-влажностных условий на водосборе Колымы [Василевская, Сточкуте, 2017; Второй..., 2014; Сточкуте, Василевская, 2016; Nesterova et al., 2020] и, возможно, деградации многолетней мерзлоты с высвобождением замерзшей воды [Davudov, 2011]. Хотя фактор ухудшения «качества первичных данных» авторами не исключается [Магрицкий, 2020]. Во-вторых, произошло межсезонное перераспределение стока воды в пользу прежде всего зимней межени: +174%. Главная причина – эксплуатация двух крупных водохранилищ (рис. 1) – Колымского (годы вывода на проектные характеристики – 1980–1989 гг., створ плотины расположен в 1893 км от моря) и меньшего по размеру Усть-Среднеканского (2013–2018 гг., в 1677 км) [Магрицкий, 2008, 2018; Magritsky et al., 2018]. В-третьих, сток взвешенных наносов среднего и нижнего течения Колымы испытал две волны мощного антропогенного воздействия [Геоэкологическое..., 2007; Магрицкий, 2001, 2016; Ушаков, 2016]. Вначале, с 1940-х гг., под влиянием масштабной горнодобывающей деятельности (прежде всего в верхнем и частично среднем течении) он заметно увеличился. Но с запуском Колымского гидроузла и удержанием водохранилищем большей части взвесей, он сократился в 1990–1997 гг. в 1,9 раза и не восстанавливался вплоть до устьевоего участка. Уменьшились и объемы золотодобычи – на 45% за 1971–1998 гг. К сожалению, после 1997 г. мониторинг расходов наносов в нижнем течении и устье прекратился. В-четвертых, климатически обусловленный нагрев речных вод (+0,5...1,0°C) и техногенное уменьшение водности половодья разнонаправлено влияют на тепловой сток Колымы в ее устье [Василенко и др., 2020; Магрицкий, 2016]. Он сократился на 6,3% (по состоянию на 2012 г.), несмотря на увеличение летом – осенью на 8,8%. В-пятых, уменьшились объемы навигации и дноуглубления.

Об этих важных ранее перечисленных и других изменениях, их гидрологических последствиях мы можем судить лишь по материалам мониторинга на посту Среднеколымск – на границе среднего и нижнего участков Колымы. Хотя в вершине устьевой области с 1977 по 2008 гг. функционировал стоковый пункт наблюдений Колымское-1 (в 9 км

ниже впадения р. Омолон), который считался замыкающим створом [Магрицкий, 2001]. Но с конца 1990-х гг. реальных измерений расходов воды на нем не проводилось. Ниже поста Среднеколымск на протяжении 640 км (вплоть до моря) сток Колымы, как и его сезонные и многолетние колебания, претерпевают существенные вдольрусловые изменения [Геоэкологическое..., 2007; Магрицкий, 2001, 2016а], поскольку нижняя Колыма, помимо многочисленных небольших притоков, принимает справа два своих самых больших притока – реки Омолон и Анной (см. рис. 1). И, по новым оценкам авторов, водный сток увеличивается от Колымского-1 к морю в среднем в 1,2 раза, а от Среднеколымска – в 1,7 раза. То есть, обладая данными наблюдений на посту Среднеколымск, мы не обладаем достоверной информацией, например, о величине стока Колымы на выходе ее в море, о дальнейшей трансформации тех внутригодовых и многолетних изменений гидрологических характеристик, что фиксируются на опорном посту. В итоге не можем адекватно судить о способности стока Колымы влиять на региональный климат, гидрологические процессы в устье и на взморье. А они, возможно, уже меняются [Osadchiev et al., 2020]. Вторая причина повышенного внимания к устью Колымы, обуславливающая актуальность и перечень решаемых проведенными исследованиями задач, – это практически полное отсутствие натуральных сведений о его современных гидрологических условиях и устьевых процессах, их реакции на меняющиеся условия формирования и транзита стока на водосборе, гидрологический режим приемного водоема. И это несмотря на еще сохранившуюся здесь экономическую активность и размещение нескольких крупных населенных пунктов, портовую инфраструктуру и речно-морское судоходство, необходимость поддерживать их бесперебойность и безопасность, развивать и встраивать в набирающий грузообороты Северный морской путь. Третья причина – это решение актуальной (для гидрологического сообщества) задачи по увязке данных спутникового зондирования водных объектов и контактных гидрологических измерений с выходом на новый, более информативный и оперативный уровень гидрологического мониторинга, а также апробация новых гидрологических приборов и методик измерений.

Единственным решением обозначенных задач стали комплексные экспедиционные исследования кафедры гидрологии суши МГУ летом 2019 г. с измерением обширного перечня гидрологических характеристик на всем протяжении устьевоего участка Колымы (с выходом на устьевое взморье) и использованием технологического оборудования, традиционных и новых методик. Сопоставление собран-

ных «в поле» материалов с данными стационарного и спутникового мониторинга позволило извлечь дополнительную ценную информацию. Таких материалов по устью Колымы, тем более по его современному гидрологическому состоянию, еще нет. Ранее, в XX в., эпизодические измерения расходов воды и другие гидрологические работы в устье Колымы выполнялись в 1928–1929, 1934–1937 (ГУСМП), 1953–1954 (Арктикпроект) [Гиляров, Иванов, 1967; Самбуренко, 1938] и совсем ограниченные в 1991 г. (ААНИИ). То, что мы знали до недавнего времени о распределении расходов воды по рукавам дельты Колымы [Михайлов, 1997], было полу-

чено главным образом расчетно-гидравлическими методами [Гиляров, Иванов, 1967; Иванов, Котрехов, 1976; Пискун, 2002]. В XXI в. состоялось уже четыре гидрологические экспедиции в устье Колымы, организованные сотрудниками кафедры гидрологии суши МГУ: 11–16 августа 2017 г. несколько измерений расходов воды выполнены Д.И. Школьным, с 24 июля по 21 августа 2019 г. состоялась комплексная гидрологическая экспедиция под рук. Д.В. Магрицкого и Н.Л. Фроловой, с 6 по 30 июля 2020 г. и с июня по август 2021 г. две экспедиции с решением геохимических задач под рук. С.Р. Чалова и В.А. Ефимова.

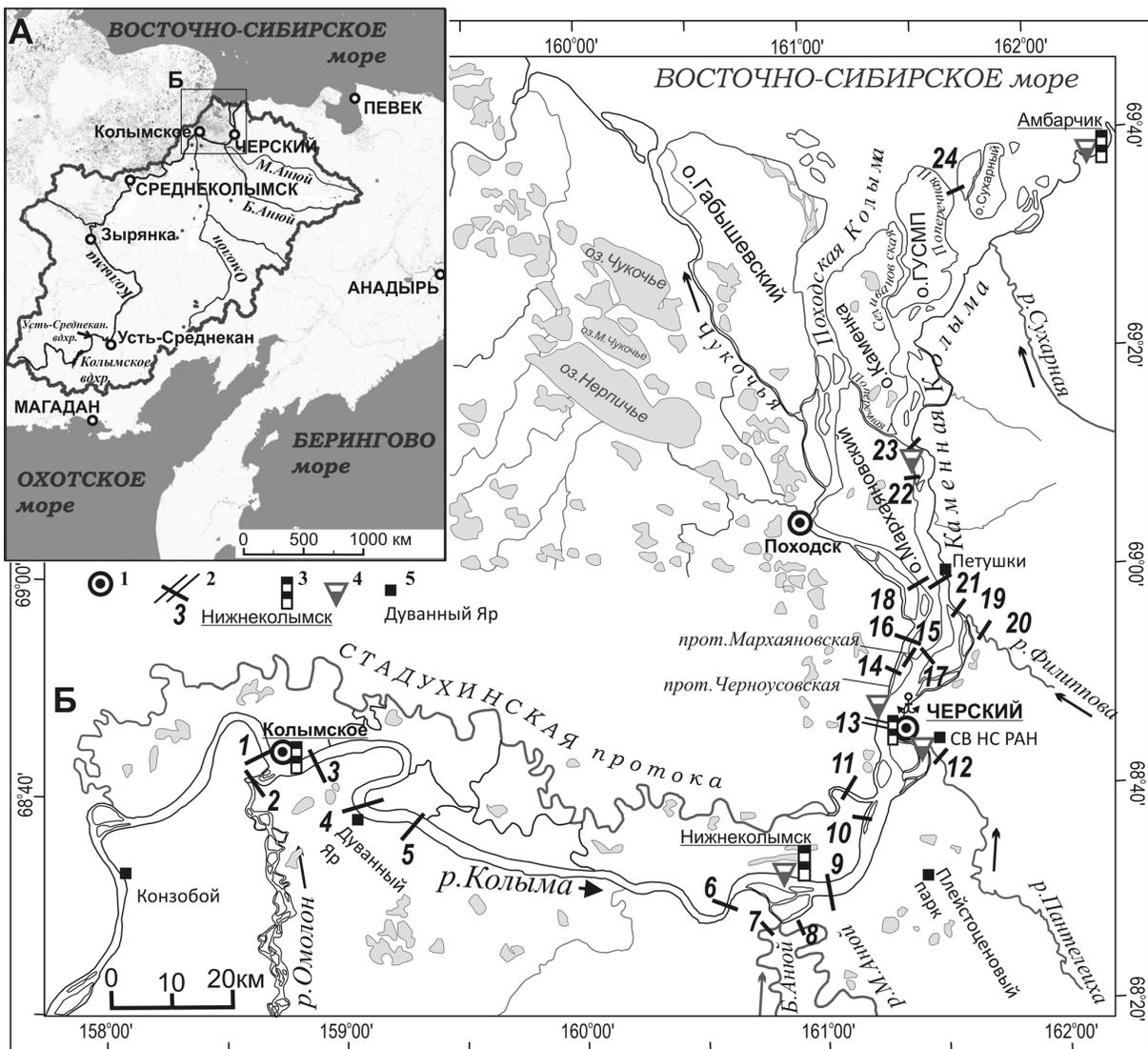


Рис. 1. Картограммы северо-восточного сектора РФ с границами бассейна р. Колымы (А) и устьевом участке р. Колымы (Б):

1 – населенные пункты; 2 – местоположение и номера расходных створов (нумерация в соответствии с таблицей); 3 – гидрологические посты РОСГИДРОМЕТА; 4 – временные посты экспедиционного отряда; 5 – примечательные места и объекты

Fig. 1. Schematic maps of the north-eastern sector of the Russian Federation with the boundaries of the Kolyma River basin (A) and the river section of the Kolyma River mouth (B):

1 – settlements; 2 – location and numbers of discharge measurement cross-sections (numbering in accordance with the table); 3 – ROSHYDROMET hydrological gages; 4 – temporary gages during expedition; 5 – notable places and objects

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Главным источником сведений о современном гидрологическом состоянии устья Колымы и устьевых процессах стали материалы экспедиционных измерений в период с 24 июля по 16 августа 2019 г. Натурными измерениями были охвачены весь устьевой участок Колымы (от устья р. Омолон до морского края дельты) и ближнее устьевое взморье вплоть до морского гидропоста Амбарчик (см. рис. 1). Местом базирования гидрологического отряда численностью шесть человек была выбрана Северо-Восточная научная станция РАН (рук. С.А. Зимов) в пос. Черском на р. Пантелеихе. Программа работ включала: 1) обустройство пяти временных водомерных постов, оборудованных логгерами Solinst и реперами, непрерывный мониторинг на них уровней и температуры воды, одно-двухразовые в течение суток измерения электропроводности воды; 2) несколько серий измерений электропроводности и температуры воды по глубине и ширине потока на протяжении устьевого участка Колымы, а также в устьях притоков и в базовом гидростворе; 3) измерения скоростей течения и расходов воды с катеров; 4) определение высотных отметок и уклонов водной поверхности в Колыме при помощи GNSS приемников; 5) отбор проб воды для установления химического состава и весовой мутности воды, а также наносов для гранулометрического и химического анализа; 6) установку в базовом створе седиментационных ловушек; 7) измерение скоростей движения донных гряд и рельефа дна с использованием эхолотного комплекса LOWRANCE; 8) рекогносцировочное обследование реки, дельтовых рукавов, устьевого взморья и берегов, а также водных объектов в Плейстоценовом парке (подробно о нем на сайте <https://pleistocenepark.ru/ru/>) с высотной съемкой его территории с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro. Часть собранных во время этой экспедиции и обработанных данных, в частности по детальному химическому составу воды и взвесей, по влекаемым наносам будет представлена в других публикациях.

Временные посты (в/п) с логгерами Solinst были оборудованы на р. Пантелеихе, перед ее впадением в Колыму и в районе пристани Северо-восточной научной станции (СВНС); на Колыме – в Нижнеколымске и Черском, в дельтовой протоке Березкина, соединенной с Каменной Колымой, на морском гидропосту Амбарчик (см. рис. 1). Самописцы уровней воды фирмы Solinst барботажные, поэтому вводилась поправка на атмосферное давление с такого же логгера Solinst, но в здании СВНС. Частота записи 15 мин. Данные с логгеров были сравнены с измерениями уровней воды на постоянных

постах Колымское, Черский и Амбарчик, любезно предоставленных наблюдателями, а также взятых с сайтов Центра регистра и кадастра [Информационная..., 2020] и AllRivers [AllRivers, 2020].

Отметки уровней воды у Черского и Нижнеколымска, уклоны водной поверхности, отметки в поперечном морфостворе были получены с помощью GNSS оборудования (Global Navigation Satellite System) фирм Leica и Trimble. Их полноценное применение для высотной привязки постов в устье Колымы было ограничено большими расстояниями от базовой станции в п. Черский и отсутствием отметок ГГС в районе исследований. Репер на посту Черский имеет высоту в условной системе координат (м усл.). В итоге, для участка протяженностью 5,67 км между поселками Черский и Зеленый Мыс перепад высотных отметок уровней воды составил 11,3 см (9 августа 2019 г.), т. е. падение оказалось 0,02 м/км. Между Нижнеколымском и Черским перепад высот 14 августа был 0,694 м (при расстоянии 36,8 км), т. е. падение составило 0,02 м/км.

Температура и электропроводность воды *in situ* измерялись электрокондуктометром MAPK (Нижний Новгород, Россия) и гидрологическим зондом YSI Pro 30 (США). Было проведено 239 измерений электропроводности – 44 на придельтовом отрезке Колымы (по 3 измерения на вертикали – у поверхности, средний и придонный горизонты, несколькими сериями), 44 – в вершине дельты (на базовом створе), 72 – в дельте, 32 – в устьях Омолона, Анюя и Стадухинской протоки, 24 – на главном посту на р. Пантелеихе, 23 – на водных объектах Плейстоценового парка. Одновременно было отобрано и стандартными методами изучено в лаборатории 46 проб воды – на основной солевой состав [Аналитические..., 2017]. Сопоставление измеренной электропроводности ( $\Sigma$ , мкСм/см) и определенной суммы шести основных ионов ( $\Sigma_i$ , мг/л) позволило получить надежную линейную зависимость для диапазона суммы ионов 60–200 мг/л:

$$\Sigma_i = 0,855\Sigma - 13,5 \quad (R^2 = 0,97). \quad (1)$$

По измерениям 10 августа в базовом створе получена зависимость, расположенная выше основной, возможно по причине увеличения содержания сульфат-ионов. Значительный объем данных по температуре воды и ее изменениям в поперечном сечении гидростворов был получен с помощью термодатчика доплер-акустического профилографа течений ADCP RiverRay. Он измеряет температуру воды у поверхности с погрешностями, имеющими систематическое отклонение. Разница температуры воды, полученной с помощью зонда и ADCP, составила всего  $\pm 0,1 \dots 0,2^\circ\text{C}$ . Поэтому при измерении

температуры воды в створах мы получали правдоподобную тенденцию ее изменения (от одного берега к другому) и разность между точками.

Большой и важный блок гидрологических работ составили измерения скоростей течения и расходов воды с помощью ADCP RiverRay в соответствии с рекомендациями РД 52.08.767-2012 [Руководящий..., 2012]. Сделано 39 измерений (двумя проходами) – на Колыме (выше и ниже впадения в нее главных притоков и протоков), в устьях рек Омолон, Анюй и Пантелеиха, в устье Стадухинской протоки, в вершине дельты (базовый гидроствор), в истоках и на отдельных участках дельтовых рукавов, в устьевом створе Второй Поперечной протоки (см. рис. 1; табл.). Измерения выполнялись почти синхронно, несколькими сериями и сопровождали остальные гидрологические определения. На базовом гидростворе с 26 июля по 16 августа 2019 г. было проведено восемь измерений расходов. Каждое из них содержало 2–3 трека, расхождение между значениями составило 0,1–1,1%. Для других створов оно не превысило нормативные 5%, кроме трех случаев (см. табл.). Управление ADCP и обработка данных измерений осуществлялись в программе WinRiver II. Расчет распределения расходов воды в узлах разветвлений и соединений выполнялся с опорой на водно-балансовые решения.

Пробы воды с взвешенными наносами отбирались с разных горизонтов с помощью погружного насоса. Далее они разделялись на жидкую фракцию и взвеси (путем фильтрования на вакуумной установке Millipore через заранее взвешенные мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм). В пробах воды определялась концентрация главных ионов, биогенных элементов, органического вещества, а также микроэлементов [Аналитические..., 2017]. Фильтры с осадком просушивались для последующего определения мутности воды, взвешенных форм микроэлементов и органического вещества. Гранулометрический состав взвешенных частиц определялся методом лазерной дифракции на лазерном гранулометре Fritsch Analysette 22 (Германия) в лаборатории географического факультета МГУ. Оптическая мутность фиксировалась сразу «в поле» при помощи портативного турбидиметра НАСН 2100р. Каждое определение состояло из трех–пяти измерений, результаты которых усреднялись. Сопоставление данных по весовой ( $s$ , мг/л) и оптической ( $OTu$ , NTU) мутности позволило построить расчетную зависимость для условий летне-осенней межени с паводками и диапазона мутности от 5 до 90 мг/л:

$$s = -0,0058OTu^2 + 1,242OTu - 0,36 (R^2 = 0,92). \quad (2)$$

Для всестороннего анализа данных по мутности анализировались также данные проекта ArcticGRO [Arctic..., 2020].

С целью характеристики метеоусловий во время экспедиционных работ были использованы данные метеонаблюдений за июль и август 2019 г. за атмосферным давлением, приведенным к уровню моря, среднесуточной температурой воздуха, суточными слоями осадков, скоростью и направлением приземного ветра с трех метеостанций: в с. Колымском (верхний участок работ), п. Черский (вершина дельты) и м/с Амбарчик (на побережье). Источники – материалы наблюдателей на метеостанциях Амбарчик и Черский, срочные наблюдения с сайта [gr5.ru](http://gr5.ru) [Расписание..., 2019].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспедиционные работы 2019 г. проводились на устьевом участке Колымы длиной 282 км. Он, согласно [Атлас..., 2017; Гиляров, Иванов, 1967; Магрицкий, 2001; Михайлов, 1997], включает придельтовый широкопойменный отрезок с верхней границей у устья р. Омолон, куда могут распространяться со стороны моря большие нагоны (обеспеченностью <10%), и многорукавную непривлившую дельту выполнения с вершиной у п. Черский. Длина и площадь дельты 120 км и 3250 км<sup>2</sup> соответственно. В 282 и 153 км от морского края дельты (МКД) в Колыму с правого берега впадают ее самые большие притоки – реки Омолон и Анюй (см. рис. 1). Одна из особенностей придельтового отрезка – наличие крупной Стадухинской протоки (длиной 350 км). Она отделяется от Колымы выше впадения р. Омолон, далее, сильно меандрируя, течет параллельно основному руслу реки и впадает в нее выше вершины дельты. Со Стадухинской соединяются практически все левобережные протоки, увеличивая ее сток.

В вершине дельты (ВД) Колыма разделяется на Каменную Колыму (правый рукав) и Черноусовскую протоку (левый) (см. рис. 1). Длина судходной Каменной Колымы ~120 км. В Каменной Колыме много песчано-илистых островов и отмелей, разделенных короткими и узкими протоками. В 7 км ниже вершины дельты она дает начало поперечной протоке Мархаяновской. Ее слияние с Черноусовской протокой образует основной левобережный рукав – протоку Походская Колыма (длина 90 км). От Походской влево отходит мелководная и несудоходная протока Чукочь длиной 91 км, самостоятельно впадающая в море. Между протоками Каменная Колыма и Походская Колыма располагаются Первая Поперечная протока (9 км), Селивановская протока (20 км) и Вторая Поперечная

Таблица  
**Данные измерений скоростей течения, расходов воды и параметров поперечного сечения потока в июле–августе 2019 г. на устьевом участке р. Колымы**

Водоток, створ (км от базового створа в п. Черском), координаты	№ на рис. 1	Дата	Количество проходов, разность, %	Ширина русла, м	Средняя глубина, м	Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Скорость течения, м/с	
							Средняя	Максимальная
Колыма, п. Колымское, выше устья р. Омолона (+164 км), 68,744116° с. ш., 158,639811° в. д.	1	1.08	2, 1	1386	6,10	6570	0,78	1,19
		8.08	2, 0	1749	4,75	5490	0,66	1,07
Омолон река, устье, 68,677025° с. ш., 158,609177° в. д.	2	1.08	2, 0	370	4,30	1230	0,78	1,18
		8.08	4, 2	335	3,85	897	0,70	1,06
Колыма, ниже устья р.Омолон (+153 км), 68,726302° с. ш., 158,904667° в. д.	3	1.08	1, нет	1960	6,04	7800	0,66	0,96
Колыма, Дуванный Яр (+123 км), 68,653411° с. ш., 159,057471° в. д.	4	8.08	2, 0	2060	3,95	5910	0,73	1,22
Колыма, Лакевская протока (+111 км), 68,619856° с. ш., 159,325185° в. д.	5	1.08	1, нет	2321	4,75	6970	0,63	0,87
Колыма, выше устья р.Анной (+51 км), 68,516662° с. ш., 160,615839° в. д.	6	1.08	1, нет	921	14,5	6670	0,50	0,76
		4.08	3, 2	986	13,5	7370	0,55	0,91
Большой Анной река, устье, 68,456403° с. ш., 160,761453° в. д.	7	3.08	3, 2	283	6,4	399	0,22	0,31
		10.08	2, 3	370	4,92	277	0,15	0,35
Малый Анной река, устье, 68,451753° с. ш., 160,885115° в. д.	8	3.08	2, 2	412	4,22	408	0,24	0,40
		10.08	2, 1	654	2,60	258	0,15	0,40
Колыма, ниже устья р. Анной (+32 км), 68,519510° с. ш., 161,062380° в. д.	9	4.08	2, 0	2525	5,70	8400	0,59	0,90
		10.08	2, 0	2423	6,13	6660	0,45	0,78
Протока к западу от о. Мал. Осередыш, 68,632220° с. ш., 161,195460° в. д.	10	2.08	4, 5	153	1,58	59,4	0,25	0,40
		2.08	4, 2	500	3,37	680	0,40	0,62
Стадухинская протока, устье, 68,659298° с. ш., 161,115631° в. д.	11	26.07	2, 3	140	2,58	21,7	0,06	0,13
		5.08	2, 11	126	2,64	33,7	0,10	0,21
р. Пантелеиха, выше впадения Пантелеихинской протоки, 68,733381° с. ш., 161,455615° в. д.	12	26.07	2, 1	3111	6,00	7290	0,39	0,61
		31.07	2, 1	3050	6,10	7620	0,41	0,65
Колыма, п. Черский – базовый створ (0 км), 68,762344° с. ш., 161,275677° в. д.	13	2.08	2, 1	2881	5,83	8520	0,51	0,87
		5.08	2, 1	3125	5,90	9670	0,53	0,83
		6.08	2, 1	2880	5,50	9010	0,57	0,86
		9.08	2, 0	3202	5,30	7940	0,47	0,75
		10.08	2, 0	3037	5,40	7210	0,44	0,66
		16.08	3, 0	3096	5,72	10100	0,61	0,87

Продолжение таблицы

Водооток, створ (км от базового створа в п. Черском), координаты	№ на рис. 1	Дата	Количество проходов, разность, %	Ширина русла, м	Средняя глубина, м	Расход воды, м <sup>3</sup> /с	Скорость течения, м/с	
							Средняя	Максимальная
Чернусовская протока (дельта), средн. отсек (-9,4 км), 68,841352° с. ш., 161,335270° в. д.	14	31.07	2, 0	507	5,87	1020	0,35	0,53
Мархьяновская протока (дельта), средн. отсек, 68,869249° с. ш., 161,392280° в. д.	15	31.07	2, 11	328	17,5	1260	0,22	0,54
Походская Кольма (дельта), исток (-16 км), 68,886988° с. ш., 161,389141° в. д.	16	4.08	2, 0	1148	6,90	3320	0,42	0,67
		16.08	2, 1	1310	11,2	3510	0,47	0,70
Каменная Кольма (дельта), ниже Мархьяновской протоки (-15,4 км), 68,876261° с. ш., 161,488226° в. д.	17	31.07	1, нет	1402	10,6	5030	0,34	0,52
		16.08	2, 0	1039	7,23	6130	0,42	0,64
Походская Кольма (дельта), исток (-16 км), 68,886988° с. ш., 161,389141° в. д.	18	16.08	2, 1	1310	11,2	3510	0,47	0,70
		31.07	2, 4	424	3,62	337	0,22	0,51
Филипповская протока (дельта), устье – ниже впадения р. Филипповки, 68,930401° с. ш., 161,602297° в. д.	19	16.08	–	–	–	460*	–	–
		5.08	2, 1	75	5,08	5,46	0,01	0,15
Каменная Кольма (дельта), ниже Филипповской протоки (-29,5 км), 68,983573° с. ш., 161,533197° в. д.	21	5.08	2, 0	1256	10,0	6190	0,49	0,75
		28.07	1, нет	141	3,86	108	0,20	0,48
Березкина протока (дельта), исток, 69,136300° с. ш., 161,446240° в. д.	22	28.07	2, 2	760	16,5	5700	0,45	0,73
		28.07	1, нет	1448	5,50	3440	0,43	0,64
Каменная Кольма (дельта), ниже впадения Березкина прот. (-51,5 км), 69,180494° с. ш., 161,466410° в. д.	23	28.07	1, нет	–	–	–	–	–
		28.07	2, 2	760	16,5	5700	0,45	0,73
Поперечная II (дельта), устьевой створ (-103,5 км), 69,585141° с. ш., 161,678545° в. д.	24	28.07	1, нет	–	–	–	–	–
		28.07	1, нет	1448	5,50	3440	0,43	0,64

Примечание: \* обозначено надежное значение, полученное по русловому водному балансу.

протока (11 км). Правый берег Каменной Колымы высокий (до 30–40 м), с каменными отвесными мысами. Левобережье дельты, наоборот, равнинное, заболоченное, с многочисленными старицами, тундровыми речками (висками) и термокарстовыми озерами. Это комплекс разновозрастных морских террас. В устьях Каменной Колымы, Походской Колымы и Второй Поперечной – обширные бары, выдвинутые в Колымский залив на 4–6 км за линию МКД. Судходная Каменная Колыма продолжается на бере бороздиной с глубинами от 4,5 до 7 м.

На устьевом участке ранее действовали три гидрологических поста – уречный в с. Колымское (в 282 км от моря и выше устья Омолона) со стоковым гидроствором Колымское-1 (272 км, ниже устья р. Омолон), уречные посты в пгт Нижнеколымск (155 км) и п. Черский (120 км) (см. рис. 1). Эпизодические уречные измерения выполнялись на посту Край леса. В 1988 г. Нижнеколымск был закрыт. Данные по стоку воды в Колымском-1 имеются с 1977 по 2008 г. В действительности же последние измерения расходов воды выполнены в 1998 г.

**Гидрологические и метеорологические условия во время экспедиции.** По погодным условиям экспедиционные изыскания можно разделить на два подпериода. До начала августа над устьевой областью Колымы господствовал циклональный тип погоды с атмосферным давлением от 995 до 1015 гПа, частыми и повсеместными осадками с середины и до конца июля (рис. 2), понижением температуры воздуха от 25°C (11 июля) до 4–10°C (и ниже) в третьей декаде июля, сильными ветрами до 5–7 м/с, в основном северных румбов, создававшими сильное волнение, ухудшавшее условия проведения измерений, а также подпор потока и подъем уровня. Вообще сильные ветры в июле и августе здесь не редкость. Циклональную погоду сменил антициклональный тип устойчивой, сухой и теплой погоды с атмосферным давлением вплоть до 1025 гПа, температурой воздуха с максимальными значениями в 18–20°C и ветрами со скоростью 1–2 м/с и даже штилем. Во время экспедиции осадков в п. Черский выпало больше, чем в с. Колымское, а минимальное их количество наблюдалось на морском побережье.

Экспедиционный выезд пришелся на летне-осенний паводочный сезон, присущий рекам с восточносибирским типом водного режима, который осложнялся сбросами из колымских водохранилищ (см. рис. 2). Об этом свидетельствуют данные водомерных наблюдений как на постоянных постах средней и нижней Колымы, так и на временных пунктах, открытых участниками экспедиционных работ. По сути, экспедиционные исследования «захватили» три паводочные волны, возможно с добавлением подпорного эффекта со стороны моря.

С первой декады июля и по конец месяца по реке прошел небольшой паводок. С конца июля наблюдалось более значительное повышение уровня с пиком 5–6 августа и постепенным спадом до 11–12 августа. После началось интенсивное и большее по величине повышение уровня вплоть до 15–16 августа и далее. Размах колебаний уровня составил около 60 см.

В пределах всей дельты отмечено влияние на ход уровня нагонных явлений, усиливающееся с продвижением к морю – от поста в Нижнеколымске к постам Черский (ВД), Край леса (средняя часть дельты) и Амбарчик на морском побережье. Причем оно проявляет себя двойко – на внутри- и межсуточном временных масштабах и более продолжительно – с учетом «муссонного» характера ветров на арктическом побережье: летом превалируют сильные ветры в направлении с холодных арктических морей на нагретую сушу, поддерживая, таким образом, высокое стояние уровней в устьях арктических рек.

**Закономерности пространственно-временной изменчивости температуры воды.** Временные флуктуации температуры воды, во-первых, следовали, прежде всего, за изменениями температуры воздуха. На первом этапе пребывания на объекте температура воды в Колыме снижалась с 13 до 9,5°C (в базовом створе и на стрежне), на втором этапе отмечен ее рост до 15–16°C (см. рис. 2). Свое влияние оказывала и водность реки, поскольку увеличение расходов воды сдерживало нагрев речных вод. Во-вторых, присутствовала явная внутрисуточная изменчивость в диапазоне от 0,1 до 2–2,5°C, усиливающаяся во время антициклонального типа погоды и с удалением от моря, а также на р. Пантелеиха, на которой были организованы непрерывные наблюдения, т. е. по сути на небольших водотоках. В-третьих, значительная ширина и сложный профиль русла Колымы и, главное, впадение притоков формировали неравномерное распределение температуры воды по ширине. Установлено, что в летний период имело место далеко распространяющееся в виде шлейфа более холодных вод, прижатых к правому берегу, охлаждающее влияние вод Омолона и Анюя на прогретые в южной части водосбора и колымскими водохранилищами воды главной реки [Геоэкологическое..., 2007; Ресурсы..., 1969]. Разница температур воды у левого и правого берегов Колымы сразу ниже устья Омолона составила до 1,5°C, ниже Анюя – до 1,2°C, в створе Черского – до 1°C (рис. 3). Она, вероятно, уменьшается с потеплением в этой части бассейна и, наоборот, возрастает с понижением здесь температуры воздуха. Небольшие по размеру и водности притоки, такие как р. Пантелеиха, а также Стадунинская протока

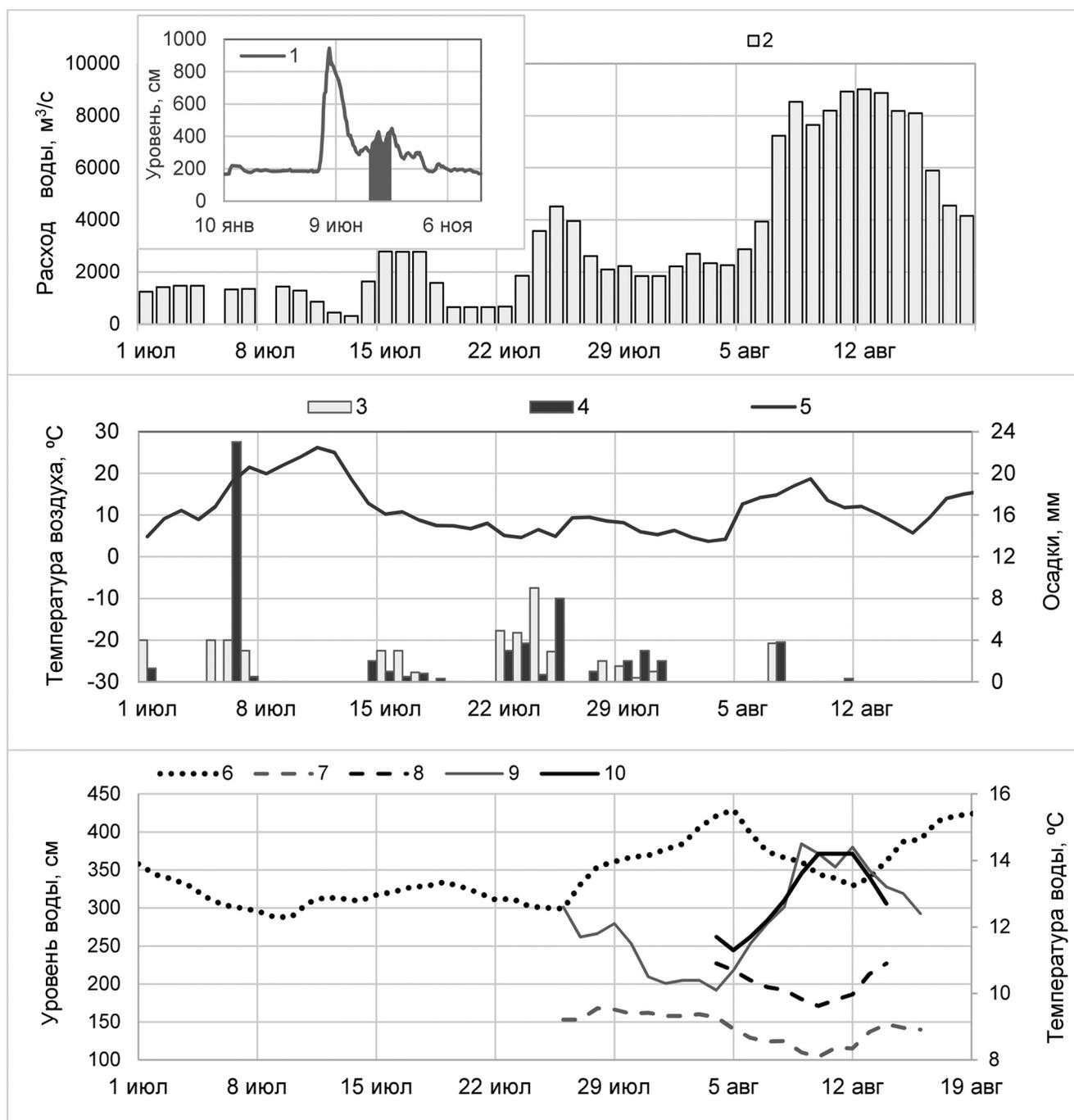


Рис. 2. Гидрометеорологические условия в июле–августе 2019 г. по данным наблюдений на постах государственной гидрометсети и экспедиционных измерений:

1 – уровень воды в р. Колыме за 2019 г. (пост с. Колымское; см над нулем поста); 2 – расход воды в р. Колыме в створе Усть-Среднеканской ГЭС [РусГидро; 2020]; 3 – осадки по м/с Колымское; 4 – осадки по м/с Черский; 5 – температура воздуха по м/с Черский; 6 – уровень воды в р. Колыме за июль–август (пост с. Колымское; см над нулем поста); 7 – уровень на в/п Черский (логгер); 8 – уровень на в/п Нижнеколымск (логгер); 9 – температура воды на в/п Черский (логгер); 10 – температура воды на в/п Нижнеколымск (логгер)

Fig. 2. Hydrological and meteorological situation in July and August 2019 according to ROSHYDROMET and expedition measurements:

1 – Kolyma water level in 2019 (Kolymskoe ROSHYDROMET gage, cm upper base level); 2 – discharges from Ust-Srednekan hydropower station; 3 – precipitation in Kolymskoe ROSHYDROMET station; 4 – precipitation in Cherskiy ROSHYDROMET station; 5 – air temperature in Cherskiy ROSHYDROMET station; 6 – Kolyma water level in July and August 2019 (Kolymskoe ROSHYDROMET gage, cm upper base level); 7 – Kolyma water level near Cherskiy settlement (logger); 8 – Kolyma water level near Nizhnekolymsk settlement (logger); 9 – water temperature near Cherskiy settlement (logger); 10 – water temperature near Nizhnekolymsk settlement (logger)

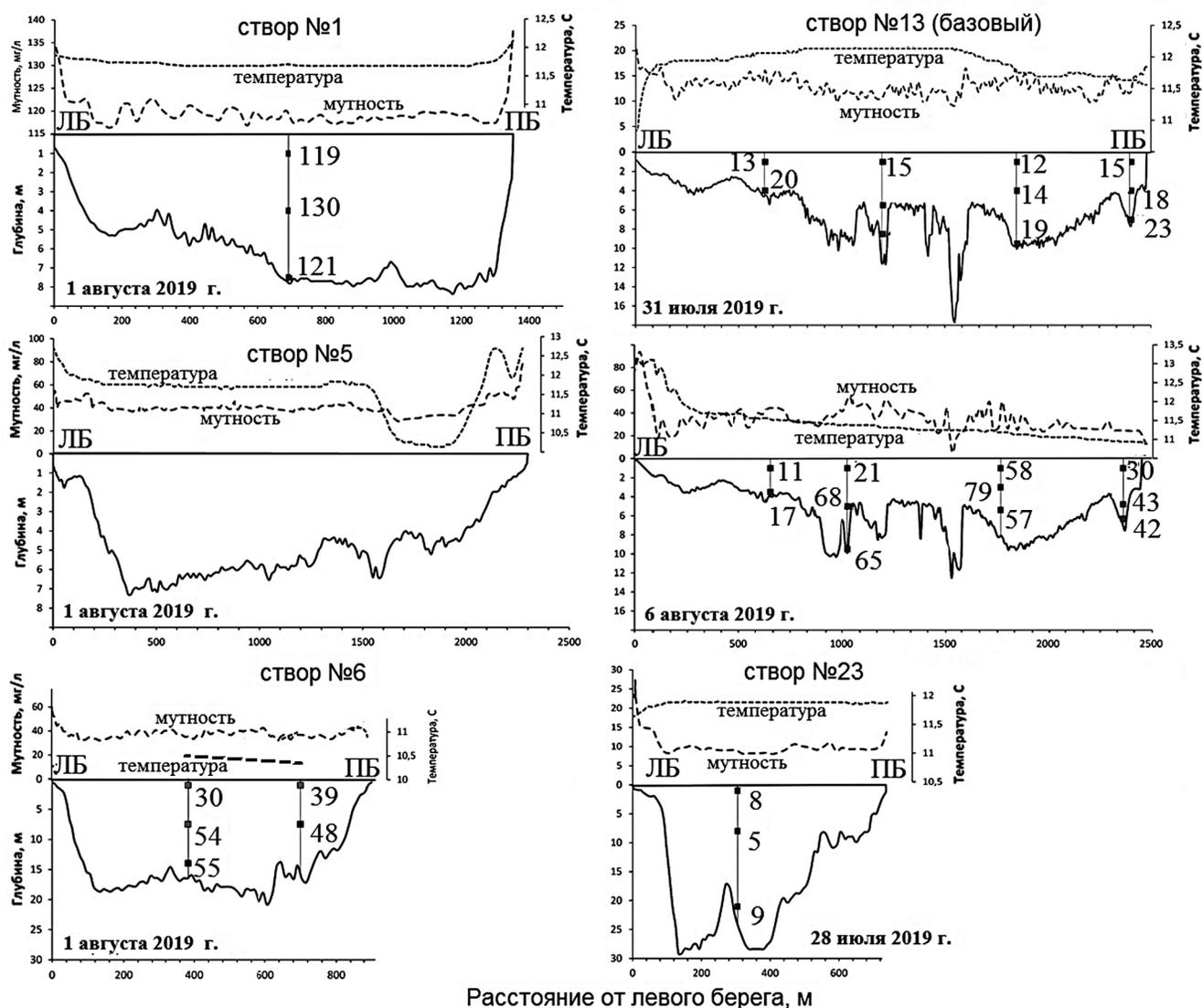


Рис. 3. Распределение температуры воды, мутности и глубины по поперечному сечению речного потока. Верхний рисунок – распределение приповерхностных температур воды (правая ось) и мутности воды (левая ось), измеренных или рассчитанных на основе данных ADCP. Нижний рисунок – значения мутности воды (мг/л) на разных горизонтах вертикалей, полученные по результатам изучения проб воды с взвешями; нижняя кривая – профиль дна. Номера створов соответствуют рис. 1

Fig. 3. Water temperature, turbidity and depth distribution into the Kolyma River channel. The upper figure – distribution of surface water temperatures (right axis) and turbidity (left axis), measured or calculated using the ADCP data. The lower figure – turbidity (mg/l) in different depths according to sediment samples, the lower curve is the bottom profile. The cross-section numbers correspond to Fig. 1

разнонаправленно влияли на температурные характеристики прибрежной зоны Колымы и пограничных дельтовых рукавов. В условиях циклональной холодной погоды воды Пантелеихи создавали локальный охлаждающий эффект на прибрежную зону у правого берега Колымы в створе Черского. А с установлением антициклональной погоды быстро нагретые воды Пантелеихи обусловили скачок температуры на 3,5°C в узкой 200-метровой прибрежной зоне, тогда как от левого берега до правой температура по всей ширине Колымы снижалась на 1–1,5°C в диапазоне от 14,5 до 12,8°C. Это

побуждает задуматься о репрезентативности публикуемых данных мониторинга за температурой воды на посту Черский, измерения которой проводятся в устье Пантелеихи. Кроме того, сравнение измеренных на посту Черский и средней по сечению в базовом створе температур воды показало, что занижение рассчитанных по ним величин теплового стока составляет от 2 до 12%. В целом, на малых водотоках после антициклонального прогрева температуры воды были на 2–5°C выше, чем в Колыме. В-четвертых, неравномерное распределение температур по ширине Колымы в базовом створе сохра-

нялось и в дельте. В западную часть дельты (Походскую Колыму) поступали более теплые колымские воды, в том числе из протоки Стадухинской, а в Каменную Колыму – колымские воды и вдоль правого берега более холодные воды правобережных притоков. Эти различия прослеживались на протяжении не менее 40 км. В-пятых, различия поверхностной и придонной температуры воды в Колыме не превышали 0,1–0,2°C, что свидетельствует о хорошем турбулентном перемешивании в потоке.

**Зоны смешения в устье р. Колымы.** Один из специфических устьевых процессов – это смешение вод реки и моря и нарастание солености воды в сторону приемного водоема, трансформация стока растворенных веществ в устьевой зоне смешения и интрузия морских вод (при определенных условиях) на устьевой участок [Михайлов и др., 2018]. В качестве удобного (в плане простоты и точности измерений) маркера этих процессов выбирают электропроводность воды ( $\Sigma$ , мкСм/см), зависящую прежде всего от концентрации растворенных в ней веществ. Анализ пространственной изменчивости электропроводности показал, что в пределах устьевого участка Колымы находятся две обширные зоны смешения. Первая – на придельтовом отрезке – вод главной реки и ее притоков, прежде всего Омолона и Анюя, вторая – в дельте и на устьевом взморье – речных и морских вод. Причем первая была во время экспедиции более выраженной.

Воды упомянутых правобережных притоков отличаются от колымской воды не только температурой, но также минерализацией и химическим составом. Колымским водам, поступающим на придельтовый отрезок, присуща повышенная минерализация: во время экспедиции она варьировала в диапазоне от 140 до 160 мг/л ( $\Sigma$ ), что в 1,5 раза выше в сравнении с 1990–2000 гг. [Геоэкологическое..., 2007]. Возможно, это следствие ранее прошедших на водосборе интенсивных дождей, хорошо промывших оттаявший верхний слой почвогрунтов. Подобный процесс описан в [Ресурсы..., 1969]. Воды гидрокарбонатные и кальциевые, но с повышенным содержанием сульфатов. Минерализация вод Омолона и Анюя – от 55 до 70 мг/л,  $\Sigma = 60–85$  мкСм/см. Воды также гидрокарбонатные и кальциевые, но концентрация сульфат-ионов почти сравнима с содержанием гидрокарбонатов. Похожие значения электропроводности в водоемах, протоках и висках Плейстоценового парка (между М. Анюем и Пантелеихой) – 65–70 мкСм/см. В итоге, на протяжении всего придельтового отрезка зафиксировано снижение электропроводности воды – от 180–200 мкСм/см выше впадения Омолона до 160–170 мкСм/см в вершине дельты (рис. 4А). Причем полного смешения колымских и омолон-анюйских

вод не происходит. И шлейф вначале омолонских вод, а затем объединенных омолон-анюйских вод, прижимающийся к правому берегу, достигает базового створа. Здесь разница между электропроводностью у левого берега – середины потока и непосредственно у правого берега составляла 40–50 мкСм/см и больше, а сумма ионов 26 июля снижалась с 125 до 83 мг/л, 10 августа – с 150–160 до 87–98 мг/л.

К средней части дельты, по-видимому, происходило полное перемешивание, и по направлению к морю электропроводность воды в главных рукавах возрастала в пределах зоны смешения речных и морских вод от 140–150 до 175 мкСм/см на морском крае дельты (см. рис. 4А). Проникновения соленых морских вод на глубине не обнаружено (измерения на вертикалях производились через каждый метр). Но повышенное содержание ионов хлора присутствовало, например, 28 июля 2019 г. в створе Край леса – 4,5–5,5 мг/л (при  $\Sigma = 114–117$  мг/л и  $\Sigma = 147–150$  мкСм/см), а также недалеко от бара Каменной Колымы – 6,5–8 мг/л (134 мг/л). В то же время, по словам жителей п. Черский и материалам Ю.А. Долженко [Долженко, 2005], до вывода Колымского гидроузла на проектную мощность во время сильных нагонов и осенне-зимних меженных расходов воды морская вода могла достигать средней части дельты вплоть до п. Петушки (в 30 км ниже базового створа). Этому также могло способствовать периодически проводившееся (до 1996 г.) дноуглубление на устьевом баре Каменной Колымы. То есть основная часть устьевой зоны смешения с ее фронтальной подзоной при расходах воды, измеренных во время экспедиции, располагалась все же на устьевом взморье. О ее местоположении и сезонной динамике можно судить по [Osadchiev et al., 2020]. Обратная ситуация – в протоке Чукочьей (см. рис. 4А). Если выше истока протоки – еще в Походской Колыме – электропроводность составила 150–155 мкСм/см, то в начале, середине и устьевом створе Чукочьей 178 мкСм/см (142 мг/л), 203 (171) и 6130 мкСм/см (3470 мг/л) соответственно. Воды хлоридно-натриевые.

Во время экспедиции – с 27 июля по 13 августа – электропроводность воды на основном посту имела наибольшие значения в конце июля – начале августа (85–105 мкСм/см), к концу первой декады августа она уменьшилась до 50–55 мкСм/см, затем снова начала увеличиваться, тем самым демонстрируя асинфазность с колебаниями уровня.

**Скоростное поле потока и продольная трансформация стока воды.** Во время экспедиции расходы воды ( $Q$ ) Колымы в ВД варьировали от 7210 м<sup>3</sup>/с (10 августа) до 10100 м<sup>3</sup>/с (16 августа) (см. табл.). Для сравнения, средний многолетний расход воды в створе Колымское-1 – 3340 м<sup>3</sup>/с, а расчетный сред-

ний на морском крае дельты – примерно 4000 м<sup>3</sup>/с. В июле 2020 г. диапазон изменений  $Q$  составил 6490–9080 м<sup>3</sup>/с, а 13 августа 2017 г. –  $Q = 11360$  м<sup>3</sup>/с. В итоге, для диапазона расходов воды от 6500 до 11400 м<sup>3</sup>/с и по 14 измерениям удалось построить кривую расходов, связавшую  $Q$  в ВД и уровни на посту Черский ( $H_{\text{ч}}$ , см над нулем поста)

$$Q = -0,0202H_{\text{ч}}^2 + 30H_{\text{ч}} + 5012. \quad (3)$$

Но «ущербность» этой связи в сильном влиянии на уровни в Черском не только расходов воды, но и сгонно-нагонных явлений [Гиляров, Иванов, 1967; Иванов, Котрехов, 1976; Михайлов, 1997]. Осред-

ненные по сечению скорости изменялись в диапазоне от 0,4 до 0,6 м/с. Они хорошо коррелируются с расходами воды. Средние в элементарных вертикальных отсеках скорости достигали максимальных значений на расстоянии 1,3–2,2 км от левого берега, увеличиваясь в 2–3 раза. Максимальные же скорости обнаружены на стрежне потока и у поверхности – 0,61–0,87 м/с. Коэффициент шероховатости равен 0,03. Это позволяет при знании уклонов водной поверхности, определяемых с помощью спутниковой альтиметрии, ширины (по спутниковым снимкам) и глубины потока (по связи с шириной – по материалам промеров 2017, 2019 и 2020 гг.) оперативно оценивать расход воды в устье р. Колымы.

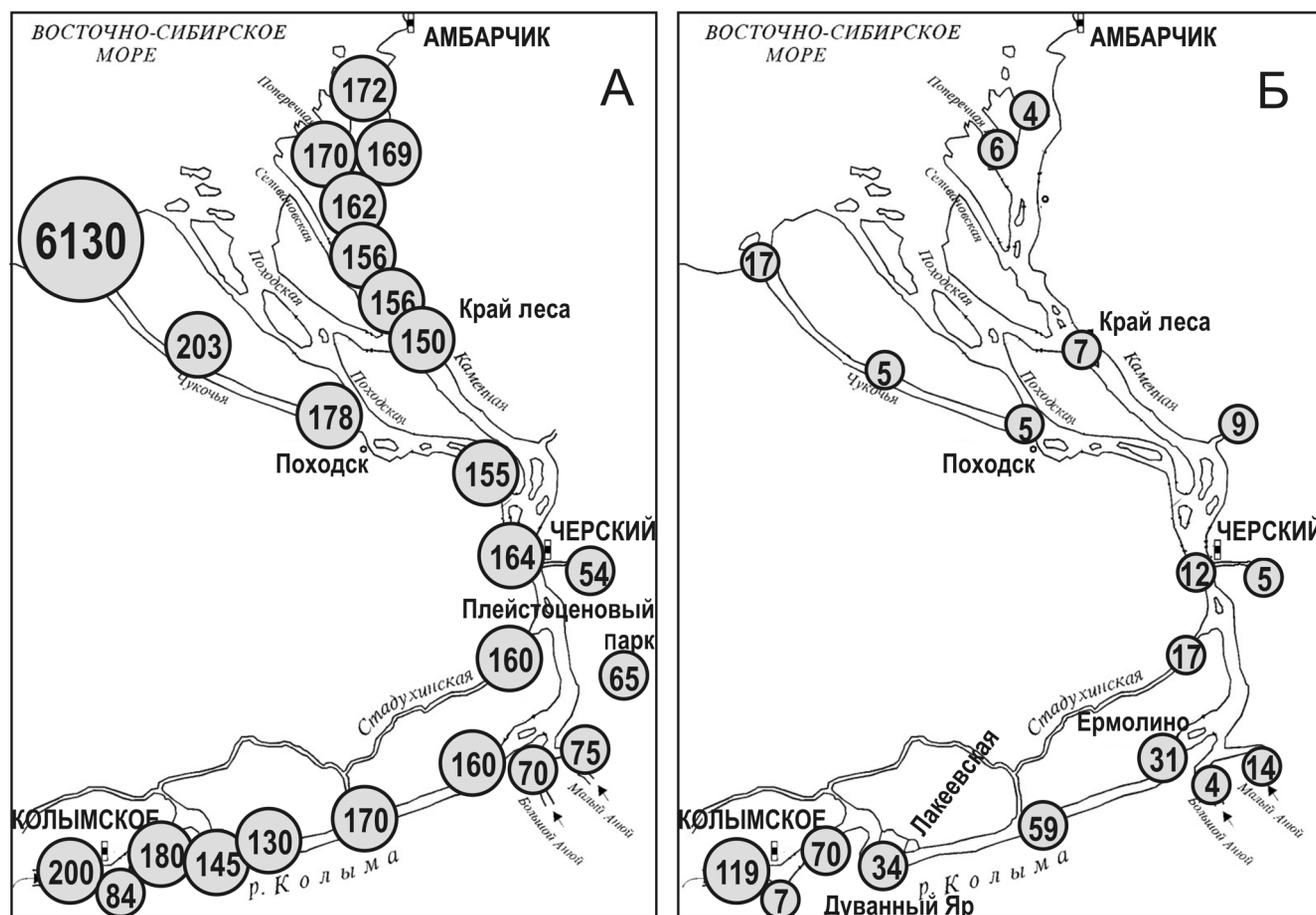


Рис. 4. Схемы пространственной изменчивости электропроводности воды, мкСм/см (А, в основном по данным измерений 28 июля и 1 августа 2019 г.) и мутности воды в стрежневой части створа на глубине 1 м, мг/л (Б) с указанием гидрологических постов, населенных пунктов, Плейстоценового парка и местных названий отдельных участков на берегу

Fig. 4. Schemes of spatial variability of water conductivity, µS/cm (A) (mainly according to measurements on July 28 and August 1, 2019) and water turbidity at a depth of 1 m, mg/l (B); hydrological gages, settlements, the Pleistocene park and native names of different riverbank sites are shown

Выше Черского, вдоль придельтового отрезка русла, расходы в Колыме увеличивались 1–3 августа (с учетом времени добегаания, равным в среднем 2 сут.) на 33% за счет поступления вод Омолона

(18,7%), Анюя (12,3%), Стадухинской протоки (того стока, который поступал в нее выше с. Колымское; приблизительно 1/6 от расхода в ее устье) и Пантелеихи. Остальные малые притоки не рассма-

тривались, так как данных по ним не было. В период 8–10 августа увеличение составило около 28%: Омолон – 16,3%, Анюй – 9,7%. 16 августа 2017 г. доля Омолона составила 23,3% при  $Q$  в Колымском 5810 м<sup>3</sup>/с. Руслевой водный баланс на придельтовом отрезке не соблюдался. Так, в первой серии измерений суммарный боковой приток ( $\Sigma Q_i$ ) превысил разницу расходов воды Колымы в створах Колымского  $Q_k$  и Черского  $Q_c$  (примерно на 10% от разности  $Q_c$  и  $Q_k$ ). Во второй серии измерений, выполнявшихся при меньших расходах воды в реке (см. таблицу), наоборот  $\Sigma Q_i < (Q_c - Q_k)$  примерно на те же 10%. То есть пойма, Стадухинская и другие протоки играют мощную регулируемую роль. Кроме того, по длине придельтового отрезка расходы в Колыме уменьшались до устья Анюя, что свидетельствовало о перетоке колымских вод в Стадухинскую протоку и др. Вообще очень важными представляются сведения по расходам воды в нижней части Стадухинской протоки, впадающей в Колыму выше п. Черский. Ранее расходы воды в ней ни разу не измеряли, хотя протока довольно большая, по водности сравнимая с Анюем, и оказывает весомое влияние на гидрологические условия устьевого участка. Средние скорости по длине придельтового отрезка снижались 1–2 августа с 0,8 до 0,5 м/с, а максимальные – с 1,2 до 0,8–0,9 м/с.

Ниже Черского, т. е. уже в дельте, главные процессы – рассредоточение стока Колымы по дельтовым рукавам, уменьшение уклонов и скоростей течения, окончательное распластывание волн половодья и паводков с перекрыванием стоковых колебаний уровня сгонно-нагонными, порой способными генерировать обратные течения. Данные измерений 2019 г. свидетельствуют о следующем распределении стока по рукавам дельты. Самым водоносным является рукав Каменная Колыма. Причем доля его стока выросла как по сравнению с данными середины XX в. и выполненными на их основе расчетами, так и по сравнению с измерениями в 1991 г. То есть этот рукав – активный, а Походская Колыма – постепенно отмирающий. Сейчас при расходе в ВД 7500–7700 м<sup>3</sup>/с (и меньше) доля стока в Каменной Колыме ниже отделения Мархаяновской протоки >70% (см. таблицу), тогда как в [Гиляров, Иванов, 1967; Иванов, Котрехов, 1976; Пискун, 2002] она 57–59%. При увеличении водности реки доля Каменной Колымы закономерно уменьшается, что опять же характеризует его как активный [Михайлов и др., 2018] и наиболее пригодный для судоходства рукав – до 64–65%, тогда как в [Пискун, 2002] доля равна 58,1%. Измерения 1991 г., итоги которых в [Пискун, 2002] подверглись сомнению, не ошибочные, и действительно происходит перераспределение стока в систему Каменной Колымы.

Для остальных рукавов и протоков установлено, что Черноусовская и Мархаяновские протоки снизили свои доли. При расходе в ВД 7620 м<sup>3</sup>/с (31.07.2019) доли Черноусовской – 13,4% (в [Иванов, Котрехов, 1976] при тех же расходах – 16,2–17,5%), Мархаяновской – 16,5% (ранее 23,5–25,7%). Доля Второй Поперечной оказалась очень большой – 45,9% (28.07.2019), что, вероятно, связано с влиянием ветро-волнового фактора. Получены расходы для ранее не исследованных водотоков – Филипповской (от 4,1 до 4,6% при увеличении расхода в ВД) и Березкиной (1,44%) проток, а также виски – протоки Походской (с истоком ниже с. Походск) – 0,35% (11.08.2017). В сторону моря средние и максимальные скорости потока уменьшались, особенно в неглубоких и узких протоках, таких как Филипповская и Березкина – до 0,2 (средняя) и 0,5 м/с (максимальная). Вблизи от МКД возможны обратные течения, которые были обнаружены в устье Второй Поперечной – в придонном горизонте.

**Закономерности изменчивости мутности воды.** Мутность в Колыме 28 июля – 3 августа была очень высокой выше впадения Омолона – средняя по сечению 120 мг/л (или 165 NTU). Ниже по течению из-за смешения с менее мутными водами Омолона (6,5 мг/л, или 6–7,5 NTU), Большого Анюя (4,6 мг/л) и Малого Анюя (9,4 мг/л), снижения уклонов водной поверхности и скоростей течения она заметно снижалась – до 16 мг/л в Черском, 6,5 и 4–5,5 мг/л на среднем отрезке (Край леса) и в устье Каменной Колымы (см. рис. 4Б). Вблизи от бара Каменной Колымы были обнаружены высокие значения мутности в придонном слое (55 мг/л) и увеличение доли песчаной фракции с 4–5 до 23% от всего объема пробы. Вероятно, это следствие обнаруженного здесь обратного течения и ветро-волнового взмучивания донных отложений.

Вблизи сильно размываемых берегов наблюдалось значительное, но быстро исчезающее увеличение мутности. Так, в створе Дуванного Яра весовая мутность в прибрежной зоне достигала 170–350 мг/л в сравнении с 70 мг/л на стрежне реки. В 2020 г. получены еще более высокие показатели. В 35 км ниже Дуванного Яра шлейф мутности частично смешивался с колымскими водами, что привело к повышению концентрации взвешенных наносов в поверхностном слое более чем на 20 мг/л. А к створу выше впадения р. Анюй мутность уже составляла 31 мг/л. Тем не менее, авторы предполагают, что именно усилившаяся после 1990-х гг. береговая термоэрозия на Колымской низменности, сложенной многолетнемерзлыми породами и полигонально-жильными льдами, – один из главных факторов современного увеличения мутности воды нижней Колымы, а не поступление наносов со

«светлыми» водами притоков. Похожее обнаружено в низовьях Лены [Магрицкий, 2015].

На всех вертикалях максимальные значения мутности регистрировались в придонном горизонте (см. рис. 3). В механическом составе наносов на долю глин (средний диаметр  $<0,001$  мм) приходилось около 6% от массы пробы (в базовом створе), илов (0,001–0,01 мм) – 45%, пыли (0,01–0,1 мм) – 42%, песка (0,1–1 мм) – 4%, гравия (1–10 мм) – 3%. В период прохождения паводка доля илов и пылеватых частиц возрастала до 55% и 49%. Средний диаметр наносов составил 0,067 мм.

В течение экспедиции мутность воды в базовом створе вначале увеличивалась вслед за увеличением расходов и уровней во время паводка. Максимальное увеличение мутности было зафиксировано в придонных слоях у левого берега Колымы (с 6 до 76 мг/л); минимальное – в поверхностных слоях у правого берега (с 12 до 17 мг/л). Потом, во время съемки 10 августа и по окончании паводка, мутность на всех горизонтах у левого берега снизилась на 20–30 мг/л. У правого берега, в зоне влияния вод правобережных притоков, мутность осталась неизменной. Съемка 16 августа проводилась на фоне нового подъема уровня. Следствием стал новый рост мутности воды по всей ширине створа – до 41 мг/л у левого берега и 35 мг/л у правого.

### ВЫВОДЫ

В июле – августе 2019 г., впервые с середины XX в., было проведено масштабное гидрологическое обследование устья р. Колымы. Программа работ включала измерения скоростей течения, уклонов и глубин, расходов, мутности, температуры и электропроводности воды, скорости перемещения донных гряд, наземную рекогносцировку и аэрофотосъемку, отбор проб воды и наносов на химический анализ. Гидрологический мониторинг проводился на пяти временных постах. Получены хорошие связи между уровнями и расходами воды, оптической и весовой мутностью, электропроводностью и минерализацией воды и др. Несколько серий измерений расходов позволили выяснить характер вдольруслового нарастания стока воды Колымы, вклад в него главных притоков и Стадухинской протоки, скоростную структуру потока, современное распределение стока в дельте. Последнее уже не соответствует гидравлическим расчетам последней четверти XX в. Доля судоходной Каменной Колымы выросла

почти на 10%. Тогда как Походская Колыма, Черноусовская и Мархаяновские протоки снизили свои доли. На придельтовом отрезке балансовые изменения стока воды регулируются начальным расходом самой реки, боковой приточностью, регулирующей ролью широкой поймы и многочисленных проток, связанных со Стадухинской протокой. Во время экспедиции вклад Омолона и Анюя был 16–19 и 10–12%, сток Стадухинской протоки был сопоставим со стоком Анюя, средние скорости продольно снижались с 0,8 до 0,5 м/с в Черском и Край леса и до 0,4 м/с на устьевом баре, зона обратных течений была обнаружена лишь в устье Каменной Колымы.

В пределах устьевого участка выделены две обширные зоны смешения. Проведено более 240 термокондуктометрических измерений, отобрано 46 проб воды. Первая зона – на придельтовом отрезке русла Колымы – зона смешения вод главной реки и ее правобережных притоков, вторая – в дельте и на устьевом взморье – речных и морских вод. Воды Омолона и Анюя отличаются от колымских существенно меньшей мутностью (5–15 против 120 мг/л), минерализацией (55–70 против 140–160 мг/л) и основным солевым составом воды с более высоким содержанием сульфатов. Воды главных притоков более холодные и их шлейф шириной несколько сотен метров, несмотря на постепенное перемешивание, достигает вершины дельты, тем самым нарушая репрезентативность наблюдений на посту Черский, и распространяется дальше. Влияние небольших притоков на температурный режим Колымы и дельтовых рукавов более сложное, обусловленное их водностью, местными изменениями температуры воздуха и осадками. В дельте содержание солей в речных водах увеличивается в сторону моря, но действительно морские воды обнаружены лишь на концевом участке Чукочьей протоки.

На пространственную изменчивость взвешенных наносов влияют разбавление колымских вод омолон-анюйскими, снижение уклонов и скоростей течения, распределение по рукавам и протокам, поступление большого объема твердого материала с размываемых берегов. На участке Дуванного Яра хорошо видно, что происходит в настоящее время с берегами, сложенными ледовыми комплексами. С помощью седиментационной ловушки, ADCP, турбидиметров и гидрологических зондов получены уникальные данные по распределению взвесей в потоке и их составу.

**Благодарности.** Исследования выполнены за счет грантов РФФИ Арктика 18-05-60021 и 18-05-60219 (материалы по мутности и минерализации воды, измерения в июле 2020 г.). Отдельная благодарность Сергею Афанасьевичу, Галине Михайловне, Никите и Анастасии Зимовым за прекрасные условия для размещения и успешной работы экспедиционного отряда; С.В. Губину – за предоставленные пробы воды по Чукочьей протоке; Д.И. Школьному.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / под ред. П.А. Лозовика, Н.А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 272 с.
- Атлас: морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России / отв. ред. В.Н. Коротяев, Г.И. Рычагов, Н.А. Римский-Корсаков. М.: АПР, 2017. 148 с.
- Василевская Л.Н., Стоцкунте Ю.В. Анализ многолетней изменчивости атмосферных осадков и высоты снежного покрова на северо-востоке России за 1966–2014 гг. // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2017. Т. 159. Кн. 4. С. 681–399.
- Василенко А.Н., Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л. Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 8–22.
- Веремева А.А. Формирование и современная динамика озерно-термокарстового рельефа тундровой зоны Колымской низменности по данным космической съемки. Пушино, 2017. 133 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. 1008 с.
- Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И.Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
- Гидрохимический атлас СССР. М.: Гидрометеиздат, 1990. 110 с.
- Гиляров Н.П., Иванов В.В. Водный режим дельты реки Колымы по лабораторным исследованиям // Труды ААНИИ. 1967. Т. 278. С. 22–38.
- Долженко Ю.А. Эффективность и экологическая безопасность обеспечения судоходных глубин на устьевых барах арктических рек Якутии. Новосибирск, 2005. 288 с.
- Иванов В.В., Котрехов Е.П. Опыт численного моделирования неустановившегося движения воды в много рукавной дельте реки // Труды ААНИИ. 1976. Т. 314. С. 16–35.
- Магрицкий Д.В. Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев рек Восточной Сибири. М.: МГУ, 2001. 300 с.
- Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 3–16.
- Магрицкий Д.В. Климатически обусловленные и антропогенные изменения стока воды основных рек Российской Федерации в их низовьях и морских устьях // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018. С. 285–294.
- Магрицкий Д.В. Проблемы информационного обеспечения исследований крупномасштабных гидрологических процессов в Российской Арктике // II Всероссийская научная конференция «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны». Расширенные тезисы. М., 2020. С. 253–256.
- Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности пространственной и многолетней изменчивости поступления речных наносов в моря Российской Арктики // Вопросы географии. Серия География полярных регионов. 2016а. Вып. 142. С. 444–466.
- Магрицкий Д.В. Факторы и особенности изменений теплового стока арктических рек России // Труды V Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». М.: РГАУ-МСХА, 2016б. С. 287–294.
- Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С. 85–95.
- Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 412 с.
- Михайлов В.Н., Михайлова М.В., Магрицкий Д.В. Основы гидрологии устьев рек: учеб. пособие. М.: Триумф, 2018. 316 с.
- Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевая область р. Колыма в современных условиях антропогенного воздействия // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 74–88.
- Пискун А.А. Методика расчета водного и руслового режима в сложно разветвленных дельтах рек при отсутствии данных наблюдений за русловыми деформациями. СПб., 2002. 155 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 280 с.
- Руководящий документ РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами Stream Pro и Rio Grande. М., 2012. 80 с.
- Самбуренко И.З. Материалы по гидрологии реки Колымы // Труды ААНИИ. 1938. Т. 105. С. 183–235.
- Стоцкунте Ю.В., Василевская Л.Н. Многолетние изменения температуры воздуха и почвы на крайнем северо-востоке России // Географический вестник. 2016. № 2(37). С. 84–96.
- Ушаков М.В. Влияние добычи золота на мутность воды реки Колымы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 9. С. 316–325.
- Davydov S.P. Global warming, permafrost and contemporary biochemical cycles: the Kolyma lowland, northeastern Siberia, *Climate change. Europe, Northern Asia, and North America. 4th European Dialogue in Evian*, 2011, p. 49–58.
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, no. 87(2), p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Nesterova N., Makarieva O., Zemlyanskova A. Hydrometeorological changes in the North-East of Russia, *E3S Web of Conferences. IV Vinogradov Conference*, 2020, vol. 163, p. 1–5, DOI: 10.1051/e3sconf/202016305010.
- Osadchiev A., Silvestrova K., Myslenkov S. Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas, *Remote sensing*, 2020, no. 12, p. 1–25, DOI: 10.3390/rs12050844.
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichin-

sky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, no. 21, p. 136–155, DOI: 10.1002/PPP.683.

РусГидро. URL: <http://www.rushydro.ru/> (дата обращения 01.03.2020).

Расписание погоды / Rp5.ru. URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения 01.11.2019).

AllRivers. Уровень воды онлайн. URL: <https://allrivers.info/> (дата обращения 20.11.2020).

Arctic Great Rivers Observatory. ArcticGRO. URL: <https://arcticgreatrivers.org/> (дата обращения 19.03.2020).

#### Электронные источники

Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Информационно-аналитический Центр Регистра и кадастра. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 20.11.2020).

Поступила в редакцию 04.03.2021

После доработки 16.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

## HYDROLOGICAL CONDITIONS AT THE MOUTH OF THE KOLYMA RIVER IN SUMMER 2019

D.V. Magritsky<sup>1</sup>, N.L. Frolova<sup>2</sup>, S.A. Agafonova<sup>3</sup>, V.A. Efimov<sup>4</sup>,  
A.N. Vasilenko<sup>5</sup>, A.A. Sazonov<sup>6</sup>, L.E. Efimova<sup>7</sup>

<sup>1-7</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology*

<sup>1</sup> *Docent, Ph.D. in Geography; e-mail: magdima@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: frolova\_nl@mail.ru*

<sup>3</sup> *Senior researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: sv\_ice@list.ru*

<sup>4</sup> *Ph.D. student; e-mail: roxifixat@yandex.ru*

<sup>5</sup> *Ph.D. student; e-mail: saiiia24@mail.ru*

<sup>6</sup> *Senior instructor; e-mail: sazonov.lexa@mail.ru*

<sup>7</sup> *Senior researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: ef\_river@mail.ru*

A poorly-studied Kolyma River mouth section (near-delta section and the delta) was surveyed in summer 2019, first since the 1950-s. The complex hydrological survey included measurements of flow rates, water discharges, water depths, water surface slopes, water turbidity, temperatures, and conductivity. We also obtained remote sensing data using quadcopter, took samples of water and sediments for chemical and other analyses, and collected field data for the satellite data calibration. Five temporary hydrological gauges with loggers were organized to monitor hydrological conditions and the passage of river floods. Some measurements were made for the first time. Several series of runoff measurements at 24 cross-sections made it possible to reveal the along-channel increase of the Kolyma River flow, the contribution of main tributaries and the Stadukhinskaya anastomosing branch, velocities structure of the flow and the actual runoff distribution within the delta. The latter is already different from hydrological calculations of the late 20<sup>th</sup> century, because the proportion of the Kamennaya Kolyma branch has increased by nearly 10%. Two zones of different water masses mixing were identified within the mouth area. The first zone is within the near-delta section where waters of the Kolyma River and its right tributaries are mixed. The second one is in the delta and on the seashore, where fresh and salt waters are mixed. The water of the Omolon and Anui rivers are less turbid (5–15 vs 120 mg/l) and less mineralized (55–70 vs 140–160 mg/l), and have basic salt composition as compared with the Kolyma River water. Waters of these tributaries are cooler. Despite gradual mixing, they flow along the right bank of the near-delta section of the Kolyma River channel reaching the head of the delta and moving further on. Thus the temperature data of the Cherskiy gauge are not representative. The influence of small inflows on the temperature regime is more complex. Mineralization of river waters increases towards the sea within the delta, but the real sea waters were found only in the lower part of the Chukochia branch. The spatial variability of the suspended sediment runoff is influenced by the dilution of Kolyma River water with waters of Anui and Omolon rivers, decreasing water surface slopes and current velocities downstream, runoff distribution in the delta, and a great amount of sediment material from eroded riverbanks, e.g. near the well-known Duvanny Yar. A new sediment trap, ADCP, turbidimeters and different probes were applied to collect unique data about sediment composition and their distribution within the stream.

**Keywords:** delta, mineralization, water temperature, sediments, mixing zone, water runoff

**Acknowledgments.** The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 18-05-60021 and 18-05-60219; materials on water turbidity and mineralization, measurements in July 2020). Our special thanks to Sergei Afanasievich, Galina Mikhailovna, Nikita and Anastasia Zimovs who provided everything for accommodation and successful work of the expedition; to S.V.Gubin for water samples from the Chukuchya Branch; and to D.I. Shkolny.

## REFERENCES

- Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike* [Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice], St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2017, 272 p. (In Russian)
- Atlas: morfodinamika ust'evykh sistem krupnykh rek arkticheskogo poberezh'ya Rossii* [Atlas: morphodynamics in the mouth systems of large rivers of the Arctic coast of Russia], Moscow, APR Publ., 2017, 148 p. (In Russian)
- Davydov S.P. Global warming, permafrost and contemporary biochemical cycles: the Kolyma lowland, northeastern Siberia, *Climate change. Europe, Northern Asia, and North America*, 4th European Dialogue in Evian, 2011, p. 49–58.
- Dolzhenko Yu.A. *Effektivnost' i ekologicheskaya bezopasnost' obespecheniya sudokhodnykh glubin na ust'evykh barakh arkticheskikh rek Yakutii* [Efficiency and environmental safety of ensuring navigable depths at the mouth bars of the Arctic rivers of Yakutia], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Technical Sciences, Novosibirsk, 2005, 288 p. (In Russian)
- Geoekologicheskoe sostoyanie arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya* [Geocological state of the Russian Arctic coast and environmental safety], Moscow, GEOS Publ., 2007, 585 p. (In Russian)
- Gidrokhimicheskii atlas SSSR* [Hydrochemical Atlas of the USSR], Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 110 p. (In Russian)
- Gilyarov N.P., Ivanov V.V. Vodnyi rezhim del'ty reki Kolymy po laboratornym issledovaniyam [Water regime of the Kolyma River delta according to laboratory studies], *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute*, 1967, vol. 278, p. 22–38. (In Russian)
- Ivanov V.V., Kotrekhov E.P. Opyt chislennogo modelirovaniya neustanovivshegosya dvizheniya vody v mnogorukavnoi del'te reki [Experience in numerical simulation of unsteady water movement in a multi-arm river delta], *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute*, 1976, vol. 314, p. 16–35. (In Russian)
- Magritskii D.V. Anthropogenic Impact on the Runoff of Russian Rivers Emptying into the Arctic Ocean, *Water Resources*, 2008, vol. 35, no. 1, p. 1–14.
- Magritsky D.V. [Climatic and anthropogenic changes in water flow of the main rivers of the Russian Federation in their lower reaches and sea mouths], *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii* [Modern trends and prospects of hydrometeorology in Russia] (Irkutsk, 21–23 marta 2018), Irkutsk, IGU Publ., 2018, p. 285–294. (In Russian)
- Magritsky D.V. [Factors and features of changes in the heat flow of Arctic rivers in Russia], *Ledovye i termicheskie protsessy na vodnykh ob'ektakh Rossii* [Ice and thermal processes at water objects of Russia] (Vladimir, 11–14 oktyabrya), Moscow, RGAU-MSKha Publ., 2016, p. 287–294. (In Russian)
- Magritsky D.V. [Problems of Information support for studies of large-scale hydrological processes in the Russian Arctic], *II Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchei sredy. Ekosistemy i klimat Arkticheskoi zony"* [Ecosystems and climate of the Arctic zone] (Moskva, 25–27 noyabrya 2020), Moscow, IGKE, 2020, p. 253–256. (In Russian)
- Magritsky D.V. *Estestvennye i antropogennye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima nizov'ev i ust'ev rek Vostochnoi Sibiri* [Natural and anthropogenic changes in the hydrological regime of the lower reaches and mouths of the rivers of Eastern Siberia], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2001, 300 p. (In Russian)
- Magritsky D.V. Faktory i zakonomernosti mnogoletnikh izmenenii stoka vody, vzveshennykh nanosov i teploty Nizhnei Leny i Vilyuya [Reasons and regularities of long-term changes of runoff of water, suspended sediments and heat on the lower reaches of the Lena and the Vilyuy], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2015, no. 6, p. 85–95. (In Russian)
- Magritsky D.V. Faktory i zakonomernosti prostranstvennoi i mnogoletnei izmenchivosti postupleniya rechnykh nanosov v morya Rossiiskoi Arktiki [Factors and regularities of territorial and long-term variability of sediment load to the seas of the Russian Arctic], *Voprosy geografii, Ser. Geografiya polyarnykh regionov*, 2016, iss. 142, p. 444–466. (In Russian)
- Magritsky D.V., Frolova N.L., Evstigneev V.M., Povalishnikova E.S., Kireeva M.B., Pakhomova O.M. Long-term changes of river water inflow into the seas of the Russian Arctic sector, *Polarforschung*, 2018, no. 87(2), p. 177–194, DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.177.
- Mikhailov V.N. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee* [River mouths of Russia and adjacent countries: past, present and future], Moscow, GEOS Publ., 1997, 412 p. (In Russian)
- Mikhailov V.N., Mikhailova M.V., Magritsky D.V. *Osnovy gidrologii ust'ev rek, uchebnoe posobie* [Fundamentals of estuary hydrology: a textbook], Moscow, Triumph Publ., 2018, 316 p. (In Russian)
- Nesterova N., Makarieva O., Zemlyanskova A. Hydrometeorological changes in the North-East of Russia, *E3S Web of Conferences. IV Vinogradov Conference*, 2020, vol. 163, p. 1–5, DOI: 10.1051/e3sconf/202016305010.
- Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. The Kolyma River mouth area under present conditions of anthropogenic impact, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2011, no. 8, p. 549–558.
- Osadchiev A., Silvestrova K., Myslenkov S. Wind-Driven Coastal Upwelling near Large River Deltas in the Laptev and East-Siberian Seas, *Remote sensing*, 2020, no. 12, p. 1–25, DOI: 10.3390/rs12050844.
- Piskun A.A. *Metodika rascheta vodnogo i ruslovogo rezhima v slozhno razvetvlennykh del'takh rek pri otsutstvii dannykh nablyudenii za ruslovymi deformatsiyami* [Method of calculating water and riverbed regime in complex branched river deltas in the absence of data on observations of riverbed deformations], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, St. Petersburg, 2002, 155 p. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface water resources of the USSR], vol. 19, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1969, 280 p. (In Russian)
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A. Thermal state of permafrost in Russia, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, no. 21, p. 136–155, DOI: 10.1002/PPP.683.

- Rukovodyashhij dokument RD 52.08.767-2012. Rasход vody na vodotokax. Metodika izmerenij akusticheskimi doplerovskimi profilografami "Stream Pro" i "Rio Grande"* [Guidance document. GD 52.08.767-2012. Water discharges of watercourses. Methods of measurement by acoustic Doppler profilographs "Stream Pro" and "Rio Grande"], Moscow, 2012, 80 p. (In Russian)
- Samburenko I.Z. Materialy po gidrologii reki Kolymy [Materials on the hydrology of the Kolyma River], *Proceedings of the Arctic and Antarctic Research Institute*, 1938, vol. 105, p. 183–235. (In Russian)
- Stochkute Yu.V., Vasilevskaya L.N. Mnogoletnie izmeneniya temperatury vozdukhа i pochvy na krainem severo-vostoke Rossii [Long-term changes in air and soil temperature at the Far North-East of Russia], *Geograficheskii vestnik*, 2016, no. 2(37), p. 84–96. (In Russian)
- Ushakov M.V. Vliyanie dobychi zolota na mutnost' vody reki Kolymy [Impact of the extraction of alluvial gold on the Kolyma River turbidity], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2016, no. 9, p. 316–325. (In Russian)
- Vasilenko A.N., Magritsky D.V., Frolova N.L. Zakonomernosti izmenenii srednegodovoi temperatury vody rek Arkticheskoi zony Rossii v svyazi s izmeneniyami klimata [Patterns of changes in average annual water temperature of the rivers in the Arctic zone of Russia under climate changes], *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2020, no. 2, p. 8–22. (In Russian)
- Vasilevskaya L.N., Stochkute Yu.V. Analiz mnogoletnei izmenchivosti atmosferykh osadkov i vysoty snezhnogo pokrova na severo-vostoke Rossii za 1966–2014 gg. [Analysis of the Long-Term Variations in Precipitation and Snow Depth in the Northeast of Russia in 1966–2014], *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta, Ser. Estestvennye nauki*, 2017, vol. 159, iss. 4, p. 681–399. (In Russian)
- Veremeeva A.A. Formirovanie i sovremennaya dinamika ozerno-termokarstovogo rel'efa tundrovoi zony Kolymskoi nizmennosti po dannym kosmicheskoi s'emki [Formation and modern dynamics of the lake-thermokarst relief within the tundra zone of the Kolyma Lowland according to satellite data], *Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography*, Pushchino, 2017, 133 p. (In Russian)
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences in the Russian Federation], Moscow, Roshydromet Publ., 2014, 1008 p. (In Russian)
- Web sources*
- AllRivers. Water level online, URL: <https://allrivers.info/> (access date 20.11.2020).
- Arctic Great Rivers Observatory. ArcticGRO, URL: <https://arcticgreatrivers.org/> (access date 19.03.2020).
- Information system on water resources and water management of Russian river basins. Information and Analytical Center of the Register and Cadastre, URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (access date 20.11.2020).
- RusHydro, URL: <http://www.rushydro.ru/> (access date 01.03.2020).
- Weather schedule, Rp5.ru, URL: <https://rp5.ru/> (access date 01.11.2019).

Received 04.03.2021

Revised 16.06.2021

Accepted 20.07.2021