

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

УДК 556.16:504.064 (282.256.66)

DOI: 10.34753/HS.2022.4.1.68

ИЗМЕНЕНИЕ КАСКАДОМ
ВОДОХРАНИЛИЩ СТОКА
ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ РЕКИ
ВИЛЮЙ

Д.В. Магрицкий¹, В.М. Морейдо²,
К.Н. Прокопьева¹

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова»,
г. Москва, Россия; ²Институт водных проблем
РАН, г. Москва, Россия
magdima@yandex.ru

CHANGES IN THE RUNOFF OF
SUSPENDED SEDIMENTS OF THE
VILYUY RIVER BY THE CASCADE
OF RESERVOIRS

Dmitry V. Magritsky¹, Vsevolod M. Moreido²,
Kristina N. Prokopeva¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow,
Russia; ²Water Problems Institute, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

magdima@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены оценки влияния каскада вилюйских водохранилищ на трансформацию расходов воды и взвешенных наносов реки Вилюй. Оценки получены на основе данных многолетних сетевых наблюдений, а также экспедиционных измерений в августе – сентябре 2021 года и материалов спутниковой съемки. В ходе экспедиционных исследований оценено распределение мутности воды по акватории и глубине Вилюйского водохранилища, исследована продольная трансформация мутности воды – вдоль руслового Светлинского водохранилища и его нижнего бьефа вплоть до поселка Сунтар. Показано, что в результате подпора Вилюйским водохранилищем, большая часть речных наносов откладывается в приустьевых зонах крупных притоков этого водоема. Здесь также наблюдается и наибольшая мутность воды по данным отбора проб воды и спутникового зондирования. По итогам георадарной съемки дна установлено, что осаждение значительной части речных наносов в верхних отсеках Вилюйского водохранилища объясняет практически отсутствие современных речных отложений в его приплотинной части. Составлен баланс наносов Вилюйского водохранилища с оценкой сбрасываемых в нижний бьеф наносов.

Abstract. Estimates of the influence of the Vilyuy river reservoir cascade on the transformation of river streamflow discharges and suspended sediments load are presented in the article. The estimates are based on long-term network observations, field measurements in August-September 2021, and satellite imagery. During the fieldwork studies, the horizontal and vertical distribution of water turbidity in the headwaters of the Vilyuy reservoir was estimated, the longitudinal transformation of turbidity patterns in the Svetlinskoe reservoir and downstream Vilyuy river to the Suntar village was assessed. It is shown that due to the backwater from the Vilyuy HPP-1,2 dams, most of the river sediments are deposited in the estuarine zones of large tributaries of the reservoir. The highest water turbidity is also observed here according to sampling and satellite imagery data. Based on the results of ground-penetrating radar survey of the reservoir bottom, it was revealed that the deposition of a significant part of river sediments in the upper compartments of the Vilyuy reservoir explains the absence of contemporary river sediments in this part near the dam. The sediment balance of the Vilyuy reservoir was calculated, accounting for the sediments released downstream of the dam. Based on all the collected data, the nature of the longitudinal transformation of the impacts of reservoirs on water

По всем собранным данным описан характер продольной трансформации воздействий водохранилищ на расходы и уровни воды, расходы наносов и мутность воды по длине среднего и нижнего течения реки Вилюй. Показано, что не только на зарегулированной реке Вилюй, но и почти на всех ее притоках доминирует тенденция к снижению стока наносов. При этом обнаружены аномалии величин стока и гидрофизических показателей в некоторых притоках реки Вилюй, подверженных сильному антропогенному воздействию.

Ключевые слова: река Вилюй; водохранилище; речной пост; экспедиционные измерения; сток наносов; антропогенное воздействие.

Введение

Одним из мощных факторов изменения величины и режима стока наносов рек служат водохранилища, влияние которых на мутность воды и в целом на речной сток наносов прослеживается вплоть до устьев очень больших и протяженных рек в азиатской части России, таких как Иртыш, Енисей и Ангара, Вилюй и Колыма [Магрицкий, 2010; Магрицкий, 2016].

Вилюйские водохранилища в среднем течении реки Вилюй – самые большие искусственные водоемы в бассейне реки Лена. Верхнее (далее – Вилюйское) водохранилище осуществляет многолетнее и полное сезонное регулирование стока реки, нижнее (далее – Светлинское) – недельное и суточное. Об аспектах влияния их воздействия на водный, ледовый и термический режим как реки Вилюй, так и нижнего течения реки Лена известно сравнительно много [Назаренко, Сахарова, 1982; Ноговицын, Кусатов, 1984; Водные пути..., 1995; Магрицкий, 2008; Магрицкий, 2009; Магрицкий, 2010; Магрицкий, 2015; Магрицкий, 2017]. Тогда как о влиянии на сток наносов мы можем судить лишь по материалам наблюдений на гидрологических постах Сунтар (в 436 км ниже Светлинской ГЭС) и Хатырык-Хомо (в 1 054 км) и практически ничего не знаем о трансформации стока наносов в самих водохранилищах и в их

discharges and levels, sediment discharges and water turbidity along the entire length of the middle and lower Vilyuy is discussed. It is shown that almost all the rivers of the Vilyuy basin show a tendency towards a decrease in their sediment runoff. At the same time, anomalies in the runoff and electrical conductivity of water were found in some tributaries of the river Vilyuy, subject to strong anthropogenic impact.

Keywords: Vilyuy River; reservoir; river gauges; expedition measurements; sediment runoff; anthropogenic impact.

нижнем бьефе. Причина – отсутствие такого мониторинга в программе работ Озерной станции Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (далее – Озерной станции) в поселке городского типа Чернышевский, а также сетевых и экспедиционных гидрометрических измерений на реке Вилюй вне участков постов.

Дефицит этих сведений существенно ограничивает изучение структуры баланса наносов в самих водохранилищах, который также включает поступление твердого материала от механической и термической абразии берегов и оценку скорости его заиления. Он не позволяет достоверно судить о продольной трансформации стока наносов в среднем и нижнем течении реки Вилюй, на которую дополнительно влияют горнодобывающие предприятия и термоэрозия берегов, о влиянии этих процессов на русловые переформирования и судоходные условия, не позволяет рассчитывать перенос загрязняющих веществ на частицах взвесей и другое. Поэтому основной целью проделанной работы стало установление роли вилюйских водохранилищ, прежде всего Вилюйского (самого большого), в изменении стока взвешенных наносов реки Вилюй и закономерностей, условий восстановления стока к устью реки.

В ее рамках решались задачи:

1) определения характера изменений мутности воды по акватории Вилуйского водохранилища и основных зон осаждения речных наносов, в том числе посредством сопоставления данных натурных измерений и спутникового мониторинга;

2) составления баланса наносов Вилуйского водохранилища;

3) установление закономерностей продольной (по длине среднего и нижнего участков реки Вилуй) трансформации нарушенного водохранилищами стока наносов, роли в ней размывов речных берегов и русла, изменившегося водного режима реки, стока наносов притоков, меняющегося под влиянием естественных и антропогенных факторов.

Материалы и методы

Главным источником данных послужили натурные гидрологические измерения на акватории вилуйских водохранилищ и в их нижнем бьефе в 2021 году. Полевые исследования состояли из двух этапов. Первый, наиболее содержательный, пришелся на 8–18 августа, сроки второго этапа – с 28 августа по 8 сентября 2021 года. Работы проведены при содействии Вилуйской научно-исследовательской мерзлотной станции института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук и Озерной станции, расположенных в поселке городского типа Чернышевский.

Программа экспедиционных работ в первой половине августа включала измерение скоростей течений и расходов воды, определение морфометрических характеристик (в гидростворах) с использованием прибора ADCP RioGrande WorkHorse (600 kHz); георадарную съемку донных отложений в нижнем отсеке Вилуйского водохранилища с

помощью георадара Python 3; инструментальное термокондуктометрическое и pH вертикальное зондирование водной толщи; отбор помпой SeaFlo (12V) проб воды из поверхностного, срединного и придонного горизонтов, их последующее фильтрование (установкой Millipore и вакуумным насосом) через два типа мембранных фильтров (диаметром 0,45 мкм) для сбора взвесей с последующим определением их гранулометрического и химического состава, объемной мутности воды. Измерения выполнены на трех створах на Вилуйском водохранилище, на пяти створах на реке Вилуй и на трех – на притоках в среднем течении реки Вилуй (рисунок 1). Отобрано и отфильтровано 26 серий проб воды. Общая протяженность обследованного участка составила ~625 км, из них 45 км – в Вилуйском водохранилище.

Работы производились во время очень низкой летне-осенней межени, водность которой в 2021 году, как и половодья 2021 года, была существенно меньше в сравнении со среднемноголетними величинами. Летне-осенние уровни в реке были на 0,5–1 м ниже средних отметок¹, а измеренные расходы воды достигали 250–350 м³/с, то есть в 1,5–2 раза ниже средних многолетних среднемесячных расходов воды на постах Сюльдюкар и Сунтар (за период с 1976 по 2019 год). Следствием низких уровней воды было увеличение площади отмелей в русле реки Вилуй, сильно осложнявших работы на реке и ухудшавших точность измерений. Причина сложной гидрологической обстановки была не в регулирующей деятельности Вилуйского водохранилища, поскольку уровень его наполнения был в 2021 году тоже на 2–2,5 м ниже обычного. Объяснение – в засушливых погодных условиях 2021 года. Температура воздуха во время первого этапа работ изменялась в среднем от 11 до 22°C².

¹Данные мониторинга Гис-портала Центра Регистра и Кадастра [Электронный ресурс]. URL: <http://gis.vodinfo.ru/>.

²Данные с сайта Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru>.

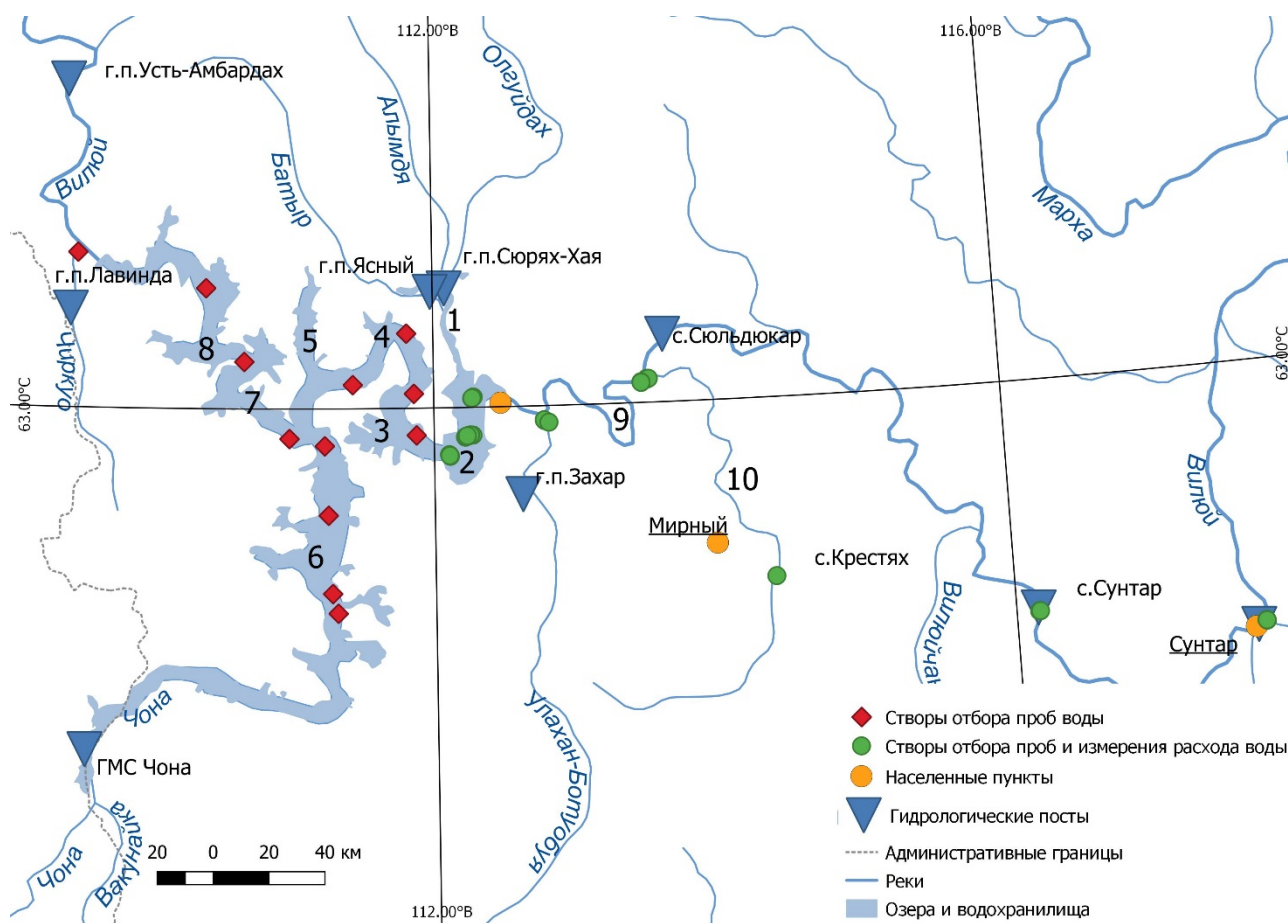


Рисунок 1. Местоположение гидростворов, станций отбора проб воды и вертикального гидрологического зондирования в августе – сентябре 2021 года:

1 – Ахтарандинский залив, 2 – Дуранинский разлив; 3 – Куцаганский разлив;
4 – залив Улахан-Негэбил; 5 – залив Денкюке; 6 – Чонский разлив; 7 – Денкюкинский разлив;
8 – залив Улагир; 9 – Светлинское водохранилище; 10 – река Малая Ботуобия (Оччугуй-Ботуобуя).

Figure 1. Location of hydrometric cross-sections, water sampling stations and vertical hydrological sounding in August – September 2021:

1 – Akhtarandinsky bay, 2 – Duraninsky broadening; 3 – Kusagan broadening;
4 – Ulakhan-Negebiel bay; 5 – Denkuke bay; 6 – Chona bay; 7 – Denkuke broadening;
8 – Ulagir bay; 9 – Svetlinskoe reservoir; 10 – Malaya Botuobuya river (Ochhuguy-Botuobuya).

Объектом второго этапа исследований был верхний бьеф Вилюйского водохранилища и приустьевые участки русел верхнего течения реки Вилюй и реки Чона (рисунок 1). Программа работ включала отбор проб воды из поверхностного слоя на всем протяжении водохранилища (от устья реки Чуркуо до входа в Куцагинскую трубу), включая Чонский разлив, устья рек Вилюй и Чона. Отбор производился с теплохода Озерной станции. Всего получено 12 проб воды, в которых измерена оптическая мутность (прибором WaterLiner WTM-86). Во время этого этапа дни с понижением температуры воздуха до 5°C (и

ниже) сменялись днями с повышением температуры до 20°C и выше.

Вторым источником сведений стали данные многолетнего гидрологического мониторинга на постах Росгидромета, главным образом расположенных на реке Вилюй и в низовьях его основных притоков (рисунок 2). Это прежде всего средние месячные и годовые расходы воды и взвешенных наносов за весь период наблюдений и вплоть до 2019 года. Их обработка и анализ производились стандартными статистическими, графическими методами и методами гидрологических расчетов.

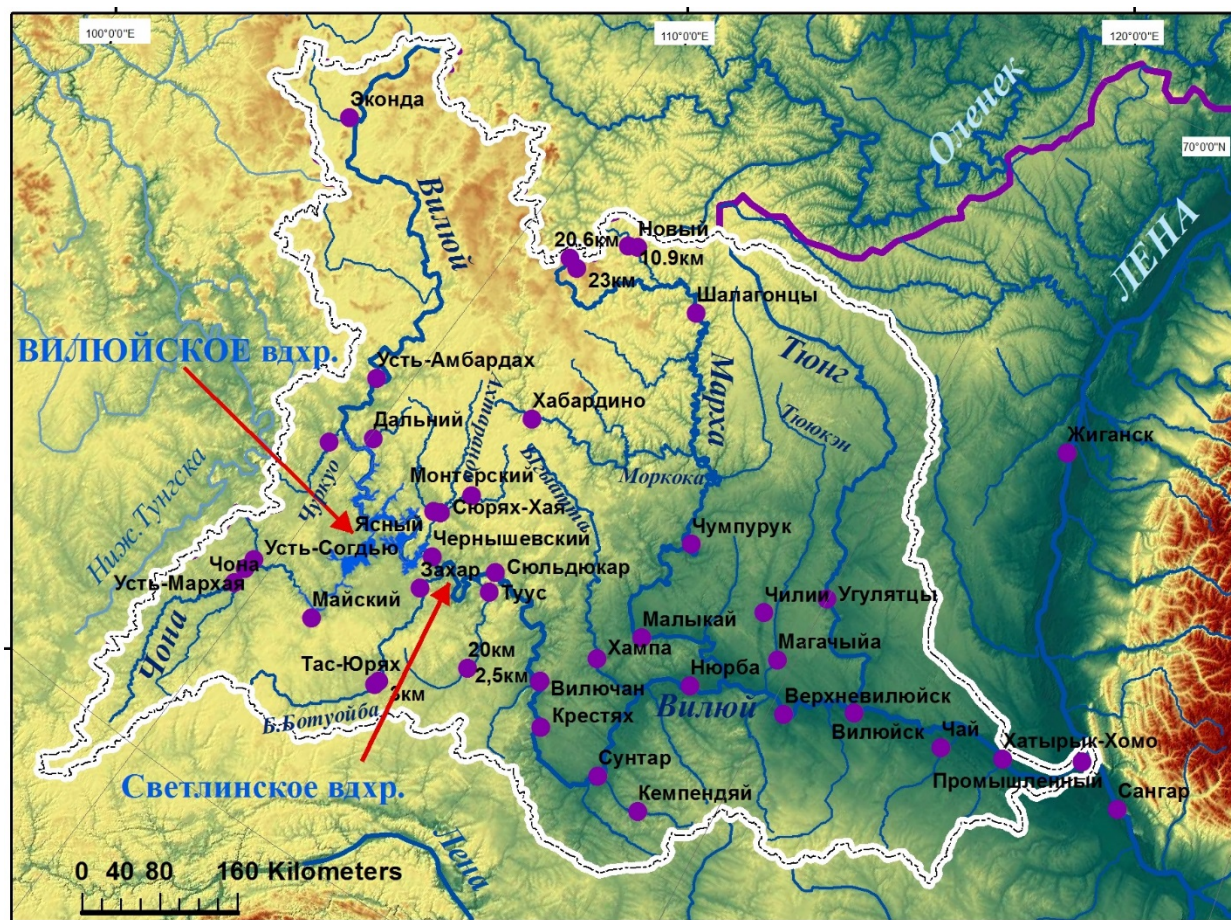


Рисунок 2. Местоположение главных водохранилищ и гидрологических постов в бассейне реки Вилуй (подложка – рельеф на основе Цифровой модели рельефа).

Figure 2. Location of the main reservoirs and hydrological gauges in the basin of the Vilyuy River (the base is a relief based on a Digital Relief Model).

Для установления закономерностей пространственной изменчивости мутности воды были привлечены спутниковые снимки и результаты их дешифрирования, в том числе с учетом их калибровки по данным натурных измерений на акватории Вилуйского водохранилища в конце августа – начале сентября 2021 года. Это перспективный и порой безальтернативный метод для мониторинга многих гидрологических процессов, включая седиментационные, и оценки их характеристик в районах, не охваченных регулярными и экспедиционными измерениями [Chalov, Prokoreva, 2021]. Установлено [Miller, Cruise, 1995], что наибольшие корреляции параметра яркости в пикселе снимка с реальной мутностью воды характерны для красного канала видимого спектра. Калибровка зависимости проводится на

основе сопоставления полевых данных измеренной мутности воды и коэффициента отражения на пикселе спутникового снимка, на который попадают координаты точки с известными значениями мутности [Chalov, Prokoreva, Habel, 2021]. В исследовании по оценке точности зависимостей значений мутности от коэффициента отражения [Чалов и др., 2019] указываются погрешности в пределах 20%, что является приемлемым для изучения характеристик стока наносов.

В работе использованы снимки съемочной системы Landsat-8 от 19 и 28 августа и 13 сентября 2021 года, которые прошли предварительную радиометрическую коррекцию (преобразование «сырых значений» (DN – Digital Numbers) в физические единицы – значения яркости на верхней границе атмосферы (ρTOA – Top of

Atmosphere Reflectance)) и атмосферную коррекцию (на исключение влияния дымки, влияющей на значения яркости [Hadjimitsis, Clayton, Hope, 2004], методом темных объектов (DOS – Dark Object Subtraction) по [Chavez, 1996]).

Путем сопоставления наземных данных и осредненного в радиусе 200–300 м значения коэффициента отражения (ρ) на снимке 28 августа 2021 года была получена зависимость:

$$S = 71,2\rho - 1,15 \quad (1)$$

где S – весовая мутность воды, мг/л;

ρ – коэффициент отражения пикселя спутникового снимка.

Верификация зависимости проведена посредством моделирования мутности по спутниковым снимкам со схожими гидрологическими и погодными условиями и диапазонами изменения мутности. Такими стали снимки Landsa-8 от 19 августа и 13 сентября 2021 года. В результате них и по уравнению (1) диапазон изменения мутности составил 2–4 мг/л.

Основные сведения об исследуемых водных объектах

Работы в августе – сентябре 2021 года проводились на всей акватории Вилуйского водохранилища, в верхнем бьефе Светлинского водохранилища, то есть между плотинами ГЭС-1,2 и Светлинской ГЭС (или ГЭС-3), и в нижнем бьефе всего каскада водохранилищ – вплоть до поста Сунтар (рисунок 1).

Вилуйское водохранилище – одно из крупнейших в стране и первое в криолитозоне. Его подпирает плотина Вилуйских ГЭС-1 и ГЭС-2 выше поселка Чернышевский и в 1 348 км от устья реки. Площадь водохранилища при нормальном подпорном уровне составляет 2 176 км² (из них в зоне периодического затопления >700 км²), полный и полезный объемы – 35,88 и 17,83 км³, соответственно [Справочник водохранилищ СССР, 1988]. Глубина водохранилища изменяется от 5 м в районе подпора реки Вилуй до 70 м вблизи плотины, средняя глубина – около 16,5–18 м. Максимальные глубины в водохранилище – до 70–80 м, ширина – до 15–20 км.

Водохранилище простирается вверх до впадения в реку Вилуй притока Чиркуо, примерно на 400 км и на 440 км до выклинивания подпора в реке Чона (рисунок 1). Расположенное в долинах рек Вилуй и Чона долинно-котловинное Вилуйское водохранилище имеет сложную конфигурацию, отличается большой изрезанностью берегов, наличием в плане четкообразных расширений (их называют разливами, заливами или плесами) шириной до 10–18 км. Они соединяются между собой сужениями (или трубами), ширина которых часто не превышает 1–2 км. Сужения приурочены к выходам траптовых тел, а расширения – к мощным осадочным толщам мезозойского и палеозойского возраста.

Первоначальное заполнение водохранилища происходило в период с весны 1967 года по 1973 год. 17 июля 1970 года государственная комиссия приняла все сооружения первой очереди Вилуйской ГЭС (ГЭС-1). 21 декабря 1975 года состоялся пуск ГЭС-2, расположенной на противоположном берегу реки. В декабре 1976 года запущены два последних агрегата ГЭС-2.

В режиме нормальной эксплуатации водохранилища, то есть после 1974–1976 годов, наполнение водохранилища происходит во время половодья – с началом в первой половине мая и окончанием во второй половине июня. После непродолжительного стояния около максимальной отметки (примерно до 10 дней) начинается снижение уровня, продолжающееся до середины августа. Затем дождевые паводки обеспечивают второй подъем уровня в среднем на 0,9–1 м [Вода России, 2000]. Зимняя сработка водохранилища осуществляется с октября до середины мая и достигает 10 м, причем площадь водоема уменьшается на 25%, а объем – на 37%.

Вилуйскую ГЭС-3, или Светлинскую ГЭС, начали строить еще в 1979 году. В октябре 1986 года. состоялось перекрытие русла реки Вилуй в месте строительства основных сооружений ГЭС – в 141 км ниже Вилуйских ГЭС-1,2, в районе поселка Светлый. Гидроузел в итоге запустили лишь 8 сентября 2004 года. В 2008 году гидростанция была официально

принята в эксплуатацию с тремя из четырех генераторов. Площадь образованного плотиной ГЭС-3 нижнего водохранилища – 104 км², полный и полезный объемы – 1,08 и 0,19 км³ соответственно. Максимальная глубина – до 50 м. Водохранилище вытянутого руслового типа.

На всем протяжении ~325 км от плотины ГЭС-1,2, включая нижнее водохранилище, река Вилюй врезана в кристаллические породы трапповой формации, а также в рифовые доломиты верхнего ордовика [Беркович и др., 1987]. Долина здесь узкая, с V-образным поперечным профилем, беспойменная. Русло чрезвычайно устойчивое, образует врезанные излучины. Поэтому характерного для нижнего бьефа крупного водохранилища размыва русла практически нет. Почти половину этого отрезка занимает Светлинское водохранилище.

Ниже по течению поверхностные отложения более податливы эрозии, но все же ограничивают развитие горизонтальных русловых деформаций. Здесь также развиты врезанные излучины и прямолинейные отрезки русла с одиночными разветвлениями. Однако форма долины в поперечнике уже ящикообразная, выделяются серии террас и узкая ступенчатая пойма. В русло поступает больше наносов, и в нем можно встретить побочни, перекаты и осередки. Этот отрезок полностью лежит на огромной Сунтарской излучине. Основные притоки впадают с правого берега. Это реки Большая и Малая Ботуобия, на водосборах которых осуществляется активная и масштабная хозяйственная деятельность, влияющая на сток наносов и растворенных веществ. С 1 020 по 518 км от устья, с нижней границей между постами Нюрба и Верхневилуйск (рисунок 2), поверхностные отложения (песчаники, конгломераты, алевролиты) еще более податливы эрозии, но развитие русловых деформаций все же ограничено [Руднев, Рудых, 1987]. Ниже устья реки Марха и особенно ниже поста Хатырык-

Хомо, где основными породами служат рыхлые четвертичные пески и меловые песчаники, наблюдаются наиболее интенсивные переформирования русла. Оно здесь свободно меандрирует, имеются песчаные острова, косы и отмели; пойма широкая.

Результаты и обсуждение

Регулирование расходов и уровней воды вилюйскими водохранилищами

При суммарном годовом притоке воды в Вилюйское водохранилище в среднем 22,5 км³ (после 1976 года) коэффициент условного водообмена $K_v = W/V_{\text{плн}} = 0,63$, коэффициент проточности $K_n = K_v \times L/365 = 0,70$, где L – длина водохранилища. Это свидетельствует о глубоком регулировании стока реки Вилюй. Вообще Вилюйское водохранилище способно регулировать 39% годового стока реки Вилюй в его устье (в средние по водности годы) и 3,6% стока реки Лена. Для Светлинского водохранилища K_v составляет около 22. Интересно, что по проекту и гидрологическим данным до начала эксплуатации водохранилищ приток оценивался меньшей величиной [Справочник водохранилищ СССР, 1988] и ему соответствовал K_v равный 0,55 и 19,9 соответственно. Современное увеличение притока речных вод в Вилюйское водохранилище подробно проанализировано в [Многолетние характеристики..., 2017].

В период после 1976 года связанные с эксплуатацией вилюйских гидроузлов суточные колебания уровня воды прослеживаются в среднем течении реки Вилюй, согласно [Магрицкий, 2015], на расстоянии 300–400 км ниже плотины ГЭС-3, недельное регулирование – до 700–850 км от плотины, то есть выше впадения в реку Вилюй притоков Марха и Тюнг (рисунок 3). Этот участок следует считать нижним бьефом каскада вилюйских водохранилищ.

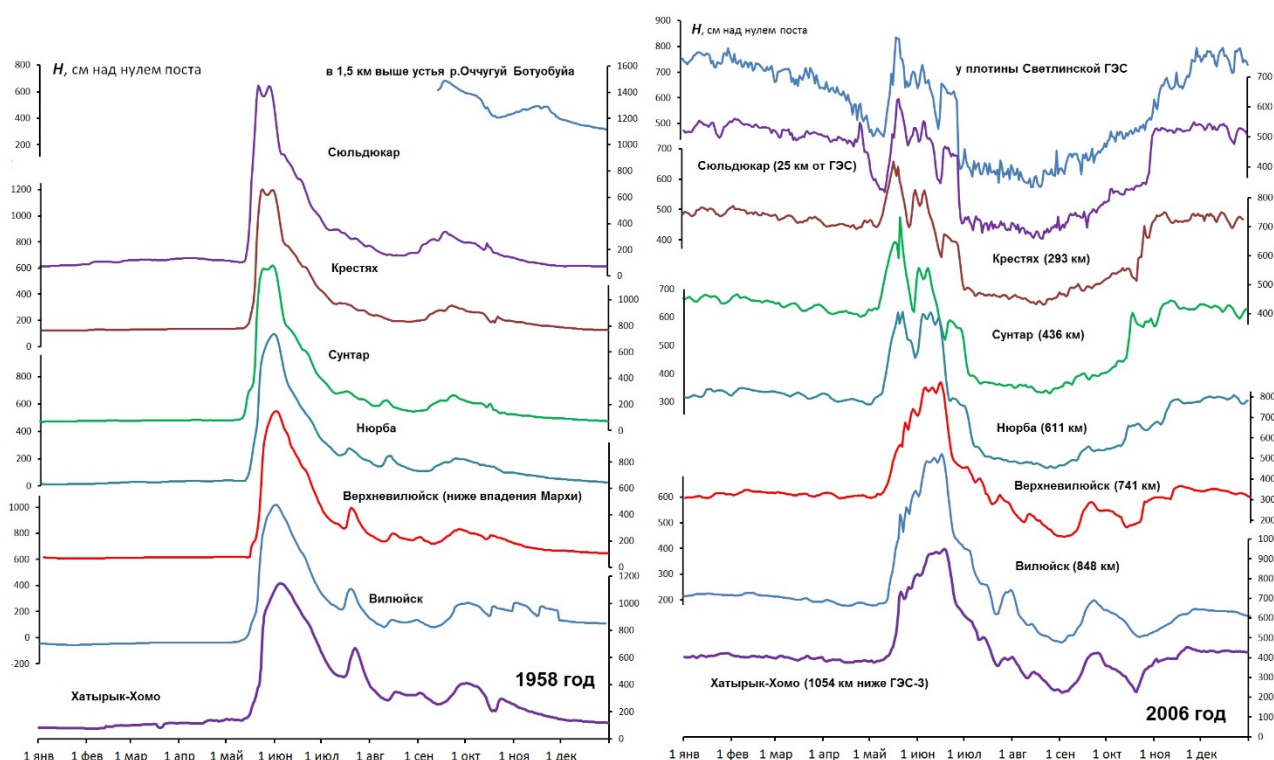


Рисунок 3. Внутригодовой ход уровней воды на постах реки Вилуй ниже Светлинской ГЭС в условиях незарегулированного (1958 год) и зарегулированного (2006 год) стока для лет схожей водности.

Figure 3. Intra-annual fluctuations in water levels at the Vilyuy River posts downstream of the Svetlinskaya HPP in 1958 and 2006.

Более существенное воздействие оказывает сезонное регулирование стока Вилуя. Для естественного водного режима реки Вилуй характерными были: высокое весеннее половодье (со второй декады мая до начала июля) с наибольшими за год расходами воды, прохождение дождевых паводков в течение летне-осеннего периода (от 1 до 7) и особенно осенью; устойчивая и очень низкая (5–20 м³/с) зимняя межень (рисунок 3). Согласно [Магрицкий, 2015], до начала заполнения Вилуйского водохранилища на весенний (май–июль), летне-осенний (август–октябрь) и зимний гидрологические сезоны в створе ГЭС–1,2 приходилось соответственно 79, 20 и 1% годового

стока воды (период с 1959 по 1966 год) (таблица 1). В период нормальной эксплуатации главного гидроузла распределение стало 26, 18 и 56%. В 580 км от плотины ГЭС-1,2 (пост Сунтар) вместо 81, 18 и 1% теперь 40, 15 и 45%; в 1 200 км (пост Хатырык-Хомо) – соответственно 77, 21 и 2% и 59, 17 и 24%. В абсолютных величинах зимние расходы воды выросли на трех постах на ~700, 700 и 650 м³/с, расходы весеннего половодья уменьшились на ~1 450, 1 500 и 1 300 м³/с, а расходы летне-осенней межени (с паводками) – на ~70, 130 и 280 м³/с. Сток летне-осенней межени уменьшился в первой половине межженного сезона и увеличился во второй.

Таблица 1. Характеристики месячного, сезонного и годового стока воды и взвешенных наносов реки Вилюй до и после ввода в строй Вилюйского водохранилища

Table 1. Characteristics of monthly, seasonal and annual runoff of water and suspended sediments of the Vilyuy River before and after construction of the Vilyuy reservoir

Характеристика	Весеннее половодье			Летне-осенняя межень с паводками			Зимняя межень	За год	Период
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI-IV		
Пост Усть-Амбардах, выше Вилюйского водохранилища									
расход воды, м³/с	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	950	2170	476	318	276	91	4,1	358	1976–1994
	1080	2120	467	360	410	117	6,6	383	1976–2019
расход наносов, кг/с	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	11,1	22,5	4,3	0,5	0,2	0,02	0,002	3,2	1976–1994
	9,9	16,8	2,3	0,5	0,4	0,02	0,002	2,5	1976–2019
мутность воды, г/м³	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	11,7	10,4	9,0	1,6	0,6	0,2	0,5	8,8	1976–1994
	9,2	7,9	5,0	1,4	0,9	0,2	0,3	6,5	1976–2019
Пост Чернышевский, у плотины Вилюйской ГЭС-1,2									
расход воды, м³/с	1980	3490	920	622	641	317	13,7	671	1959–1966
	450	920	1060	416	478	511	702	671	1976–1994
	541	993	886	462	538	560	750	707	1976–2012
Пост Сюльдюкар, в 175 км ниже Вилюйской ГЭС-1,2 и в 25 км ниже Светлинской ГЭС									
расход воды, м³/с	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	1190	1170	1150	446	490	505	683	754	1976–1994
	1360	1280	923	483	547	577	724	792	1976–2019
расход наносов, кг/с	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	13,6	8,7	6,2	2,4	3,1	1,9	1,0	3,5	1976–1994
	–	–	–	–	–	–	–	–	–
мутность воды, г/м³	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	11,4	7,4	5,4	5,4	6,4	3,7	1,4	4,6	1976–1994
	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Пост Сунтар, в 436 км ниже Светлинской ГЭС									
расход воды, м³/с	2550	4615	1195	618	611	403	21	843	1957–1966
	1780	1340	1290	513	490	467	702	840	1976–1994
	1990	1490	1045	529	555	540	736	881	1976–2019
расход наносов, кг/с	78,7	91,5	7,9	4,3	1,7	0,7	0,01	15,4	1957–1966
	31,8	13,4	7,5	2,0	1,7	1,3	1,76	5,2	1976–1994
	30,3	11,4	5,9	3,8	2,9	1,2	1,39	5,1	1976–2019
мутность воды, г/м³	30,9	19,8	6,6	7,0	2,8	1,8	0,6	18,3	1957–1966
	17,9	10,0	5,8	3,9	3,5	2,8	2,5	6,2	1976–1994
	15,2	7,7	5,7	7,2	5,2	2,1	1,9	5,8	1976–2019
Пост Хатырык-Хомо, в 1 054 км ниже Светлинской ГЭС									
расход воды, м³/с	2030	9620	3300	1440	1420	890	78,6	1600	1957–1966
	2860	6160	3090	1360	1100	679	717	1630	1976–1994
	3400	6270	2670	1260	1420	835	761	1700	1976–2019
расход наносов, кг/с	109	521	63,1	24,5	17,5	10,2	0,17	62,2	1957–1966
	108	241	60,0	19,5	14,9	7,1	2,94	38,4	1976–1994
	109	241	61,0	21,0	25,8	6,9	3,14	41,0	1976–2010
мутность воды, г/м³	53,9	54,2	19,2	17,0	12,4	11,4	2,2	38,9	1957–1966
	37,8	39,2	19,3	14,4	13,6	10,5	4,1	23,6	1976–1994
	31,9	38,4	22,8	16,6	18,2	8,3	4,1	24,0	1976–2010

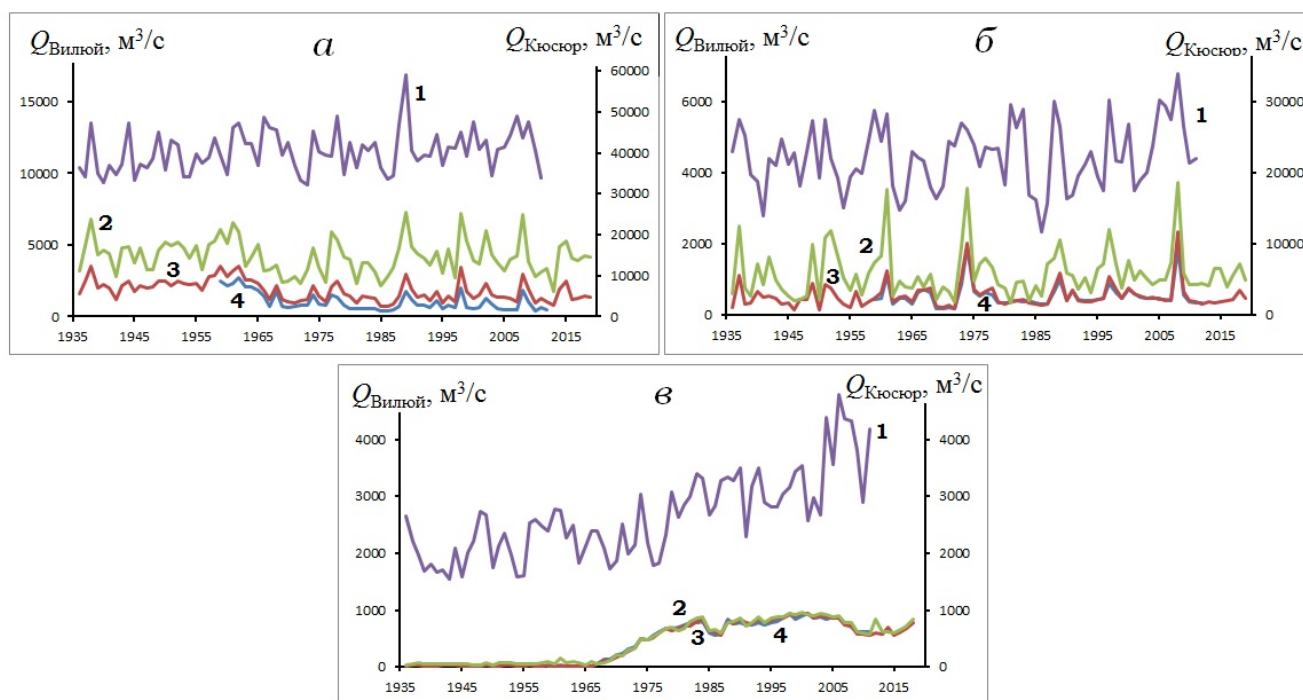


Рисунок 4. Многолетние аспекты сезонного регулирования стока рек Вилюй и Лена: весеннего половодья (а), летне-осенней (б) и зимней (в) межени.

Посты: 1 – Кюсюр; 2 – Хатырык-Хомо; 3 – Сунтар; 4 – Чернышевский.

Figure 4. Long-term aspects of seasonal regulation of the flow of the Vilyuy and Lena rivers: spring high water (a), summer-autumn (b) and winter (v) low water.

River gauges: 1 – Kyushur; 2 – Khatyryk-Homo; 3 – Suntar; 4 – Chernyshevsky.

Влияние Вилюйского водохранилища на внутригодовой режим водного стока уменьшается с удалением от плотины, но полностью, как видно из рисунков 3, 4, не исчезает. Регулирование зимнего стока прослеживаются не только до устья реки Вилюй, но и до устья реки Лена [Магрицкий, 2001; Магрицкий, 2015], поскольку боковая приточность и сами расходы зимой очень незначительные. Многие притоки, впадающие в реку Вилюй ниже плотин ГЭС, зимой перемерзают, и продольное нарастание зимних расходов воды происходит в основном за счет поступления воды из подрусловых аллювиальных отложений, а их уменьшение – за счет процессов ледообразования. Масштаб этих естественных изменений не превышает несколько десятков $\text{м}^3/\text{с}$, что не может компенсировать существенное, исчисляемое несколькими сотнями $\text{м}^3/\text{с}$, увеличение зимнего стока реки Вилюй в зарегулированных условиях.

Многолетнее регулирование стока рек почти не изменяет средний многолетний сток рек, но влияет на годовые Q и их межгодовую изменчивость. Для реки Вилюй реальные величины межгодового регулирования составили диапазон от $-8,5$ до $+5,6 \text{ км}^3/\text{год}$.

Сток наносов и вилюйские водохранилища

Водохранилища заметно сократили сток наносов реки Вилюй, и этот эффект сохраняется вплоть до впадения в реку Лена [Магрицкий, 2010; Магрицкий, 2015]. В настоящее время у авторов появилось больше данных, чтобы изучить этот вопрос, а также оценить вклад нового водохранилища, образованного плотиной Светлинской ГЭС.

Важно указать, что водохранилища и их водосбор расположены в районе со слабым развитием эрозионных процессов, прежде всего из-за распространения здесь трапповых плато, сложенных трудно размываемыми вулканическими базальтами, туфами и известняками [Траппы Сибири и Декана, 1991].

Кроме того, многолетняя мерзлота, прохождение основного стока (за год) при еще не оттаявших грунтах, короткий теплый период и дефицит летне-осенних дождей, залесенность водосбора никак не способствуют развитию активной эрозии. Поэтому на единственно известных картах среднегодовой мутности воды рек из [Ресурсы..., 1972, Сток наносов..., 1977], созданных по данным на конец 1960х – начало 1970х годов, средняя мутность речных вод на рассматриваемой территории <25 г/м³. Новые данные по мутности воды и стоку наносов рек в бассейне реки Виллой (по состоянию на 2019 год) показывают, что этот диапазон и средняя мутность воды составляют уже менее 10–15 г/м³ (таблица 2). Исключением служит река Малая Ботубоя (или Оччугуй-Ботубуйа) и ее левый приток река Ирелях, испытывающие сильную нагрузку на качество воды и концентрацию взвесей со стороны алмазодобывающего предприятия [Захарова, 1984]. Похожая ситуация, однако не подкрепленная надежными данными, в верховьях реки Марха – на участках алмазодобычи у поселков Удачный и Айхал. Активизация русловой эрозии и увеличение мутности вод притоков реки Виллой (до 25–50 г/м³) наблюдается ниже устья реки Марха, по причине особенностей геолого-геоморфологических и криолитологических условий (см. выше).

Виллойское водохранилище стало основным барьером для наносов реки Виллой, главным фактором антропогенного и заметного уменьшения мутности и расходов взвешенных наносов в его среднем и нижнем течении. По материалам наблюдений на постах на водосборе водохранилища, стандартным расчетным способом для рек и ручьев, не охваченных

наблюдениями (по СП 33-101-2003³), и с учетом сведений из [Многолетние характеристики..., 2017] установлено, что в водохранилище поступает, с момента его нормальной эксплуатации, почти 22,5 км³ речных вод в год: 82% во время половодья, 16,5% в летне-осеннюю межень с осенними паводками. Его распределение по рекам показывает, что 65% из этого объема – это приток по основным рекам, 75% – это река Виллой и реки, впадающие с севера.

Зная величину и внутригодовой режим притока речных вод, вклад (помесячно) в него южных и северных рек, различающихся по водному режиму и распределению расходов воды в течение года, по мутности речных вод, а также имея многолетние данные по среднегодовой и среднемесячной мутности воды на постах Усть-Амбардах (река Виллой) и Хабардино (река Моркока) для северных рек и на постах Чона (река Чона) и Захар (река Улахан-Ботубуйа) для южных рек (таблица 2), можно оценить поступление взвешенных наносов в Виллойское водохранилище. Получилось, что среднемноголетний годовой сток речных взвесей в Виллойское водохранилище примерно равен 200 тысяч тонн. Из них 78,3% приходится на северные реки, включая верхнее течение реки Виллой. Доля мая равна 46,6%, июня – 43,1%, июля – августа – 9,1%, сентября – октября – 1,1%.

О том, что происходит с речными наносами в Виллойском водохранилище, о пространственной изменчивости мутности воды теперь можно судить по материалам экспедиционных измерений на всей акватории водоема и результатам дешифрирования спутниковых снимков в августе – сентябре 2021 года.

³СП 33-101-2003. Свод Правил по определению расчётных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

Таблица 2. Средняя мутность воды в реках и ручьях в бассейне реки Вилуй (естественные величины). Расположение постов показано на рисунке 2.

Table 2. Average turbidity of river water in the basin of the Vilyuy River. The location of the gauges is shown in Figure 2.

Река	Пост		Площадь водосбора, км ²	Мутность воды, г/м ³		
	название	код		величина, г/м ³	период	приведенная к многолетнему периоду, г/м ³
Вилуй	Усть-Амбардах	03310	57 300	6,6	1973–1996, 2000–2019	6,6
	Сунтар	03321	202 000	18,3	1957–1966	18,0
	Хатырык-Хомо	03329	452 000	35,8	1960–1963, 1966	42,0
Чона	Чона	03334	21 000	6,3	1976–2019	6,3
Улахан-Ботуобуйа	Тас-Юрях	03348	9 230	15,7	1975–1992	15,7
	Захар	03355	16 900	5,8	1993–2019	5,8
Оччугуй-Ботуобуйа	в 20 км выше устья реки Ирелях	03350	6 290	8,2	1972–1974	–
	в 0,1 км ниже устья ручья Малый Тымтайдаах	03612	8 280	178¹	1979, 1980	–
Кэмпэндээйи	Кемпендай	03360	1 290	46	1988–2019	40
Марха	в 20,6 км от истока	03364	147	1,4	1976, 1977	–
	Малыкай	03367	89 600	17,8	1972–2019	17,8
Сохсолоох	23 км от устья	03368	226	34²	1961, 1962, 1969–1972	–
Ойуур-Юреге	24,3 км от устья	03371	33	2,0	1967–1969	–
Далдын	Новый	03373	1 990	14,3	1967–1977	14,3
Сытыкан	24 км от устья	03375	706	16,6	1973–1975	–
	19 км от устья	-	719	6,4	1970–1972	6,5
	10,9 км от устья	-	770	8,3	1961, 1966–1969	8,4
	4,8 км от устья	03378	805	4,8	1960	–
Улахан-Басыттаах	1,3 км от устья	03379	276	5,4	1968–1977	–
Моркока	Хабардино	03383	18 600	10,0	1975–1995	10,0

Примечание: 1 – под воздействием горнодобывающей деятельности,

2 – выше хвостохранилищ, но возможно, влияние с их стороны есть.

Как и предполагалось, большая часть речных наносов откладывается на концевых участках рек, впадающих в водохранилище – в зоне подпора, и в приустьевых зонах Вилуйского водохранилища в связи с резким снижением наносотранспортирующей способности речной струи, выходящей в виде стокового течения в водоем. Этот процесс можно приблизительно описать уравнением из [Михайлов, 1998], полученным для открытых устьевых взморьев рек при отсутствии ветра и волнения. К плотине ГЭС-1,2 течениями переносятся только мелкие взвеси речного генезиса. К ним добавляется материал, образовавшийся вследствие размыва берегов водохранилища [Константинов, 1984; Бурлаков, 1987; Кудояров, Оникиенко, 1990; Великин и др., 2013; Чжан, 2018]. Протяженность таких берегов составляет 13% от общей протяженности береговой линии: 270 км в «вилуйской» части водохранилища и 50 км в «чонской» части. Они есть и у самых нижних расширений – Дуранинского и Ахтарандинского разливов, и способны быть крупным источником взвесей для нижнего отсека водохранилища. И какой на самом деле генезис взвесей, сбрасываемых Вилуйским гидроузлом в нижний бьеф, какова доля в них речных наносов, неизвестно.

Мутность воды в водохранилище очень низкая. В середине августа в поверхностном слое приплотинной части водохранилища она составила 1,5–2,5 единиц мутности (далее – NTU), увеличиваясь в 1,1–1,5 раз по глубине и незначительно к берегам и мелководьям. При этом для столь малых значений мутности воды коэффициент перехода от оптической мутности к весовой (мг/л) оказался равным ~0,95–1,00, по результатам обработки взвесей, осевших на фильтрах с диаметром пор $d=2-3$ мкм, и существенно меньше (~0,65–0,70) для фильтров с диаметром пор $d=8-12$ мкм. В начале сентября мутность в поверхностной толще была немного

выше (2,2–2,9 NTU), чем в августе, вероятнее всего, из-за усиления ветро-волнового взмучивания. Ближе к впадению верхнего Вилуя мутность увеличивается больше, чем к устью реки Чона, что согласуется с данными сетевого мониторинга. Помимо этого, в Чонском расширении по направлению к самой реке Чона мутность уменьшалась во время второй экспедиции – с 2,77 до 2,05 NTU.

Теоретические предположения и материалы экспедиционных измерений подтверждают результаты дешифрирования откалиброванного спутникового снимка Landsat-8 от 28 августа 2021 года. На снимке видно, что наибольшая мутность присуща верхней и частично средней части Вилуйского водохранилища (рисунок 5). Наибольшие средние значения мутности (3,0–3,4 мг/л) обнаруживаются в приустьевых зонах рек Вилуй, Чона и других, мутьевой шлейф от которых визуально отмечается на расстоянии еще 20 км. К приплотинной части мутность уменьшается и составляет 2,2 мг/л. Резкие повышения мутности фиксируются в береговой зоне и небольших заливах (до 40 мг/л), связанные с размывом берегов и ветро-волновым взмучиванием в мелководной береговой зоне.

Небольшая мутность и расположение основной зоны осаждения речных наносов в верхней части Вилуйского водохранилища и в приустьевых зонах рек объясняют отсутствие сколько-нибудь значимого заиления днища водохранилища на участках георадарной съемки – в Кусагинской трубе и разливе, в Городской трубе. Но хорошо идентифицируются прежние пойменно-русовые отложения реки Вилуй мощностью от 3 до 5 м, наслаивающиеся друг на друга, или перекрытые склоново-оползневыми массами и расположенные на более высоких высотных отметках, чем современное русло реки Вилуй и денудационная пойма – на затопленных террасах. Последних не менее 2–3.

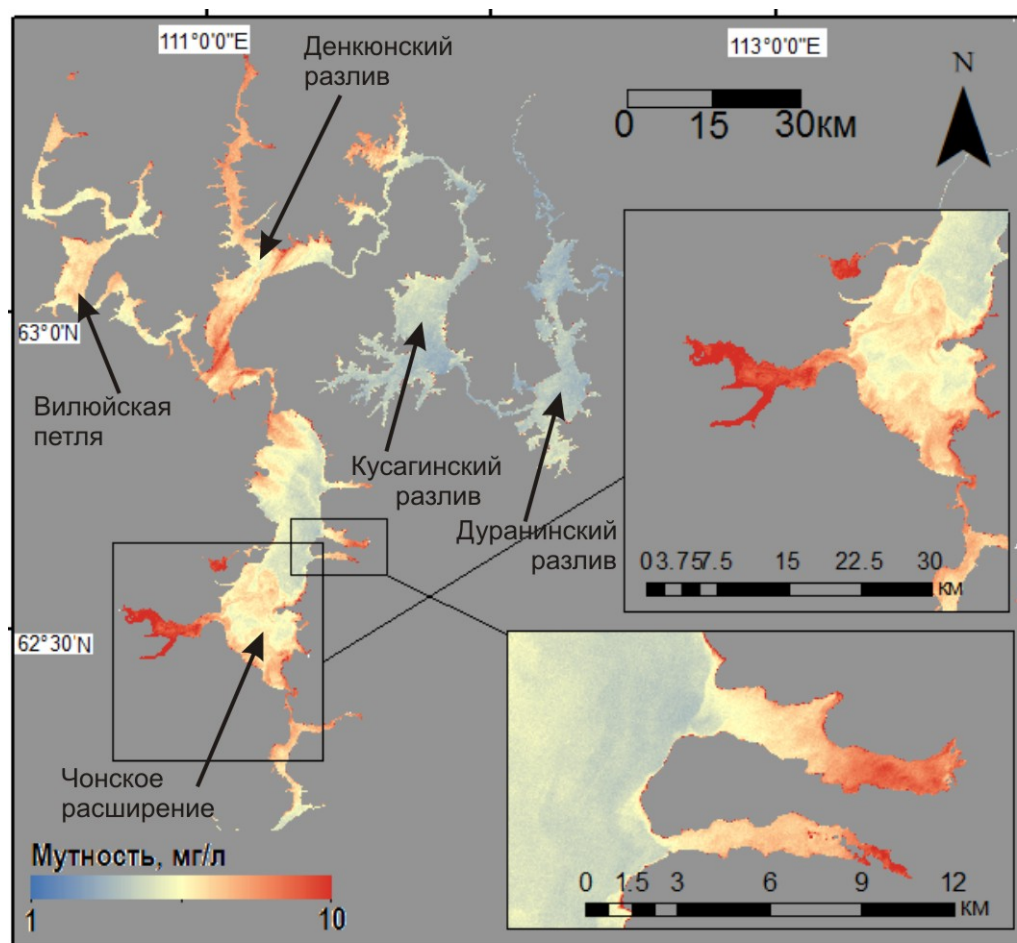


Рисунок 5. Распределение мутности воды по акватории Вилуйского водохранилища. По данным дешифрирования спутникового снимка Landsat-8 от 28 августа 2021 года.

Figgy 5. Distribution of turbidity of water in the Vilyuy reservoir. According to the Landsat-8 satellite image dated August 28, 2021.

В нижний бьеф Вилуйской ГЭС-1,2 и соответственно в верхний бьеф Светлинского водохранилища поступают трансформированные речные воды с такой же мутностью, как и в Городской трубе. О количестве наносов, сбрасываемых в нижний бьеф Вилуйской ГЭС-1,2, можно судить лишь по данным мониторинга за стоком наносов на посту Сюльдюкар, который находится в 175 км ниже ГЭС-1,2 и в 25 км ниже ГЭС-3. По данным этого поста, средний годовой сток наносов реки Вилуй был равен 110 тысяч тонн в период с 1976 по 1994 год, а в период с 1976 по 2012–2014 годы мог быть немного больше – 115 тысяч тонн. Между плотиной Вилуйской ГЭС-1,2 и Сюльдюкаром площадь водосбора увеличивается на 32 тыс. км², годовой сток воды – почти на 3 км³ (для условий периода с 1976 по 2012–2014 годы). Притоки реки

Вилуй на этом участке имеют небольшую мутность, в среднем 8 г/м³ (за исключением загрязненной реки Малая Ботуобия). Соответственно они способны поставлять около 25 тысяч тонн взвешенных наносов в год. Принятие этого руслового баланса наносов приводит к стоку наносов в створе Вилуйской ГЭС-1,2 в 90 тысяч тонн. Еще одним источником наносов на участке Чернышевский – Сюльдюкар и следовательно неучтенным слагаемым руслового баланса могли быть (до пуска в строй Светлинской ГЭС) эрозионные, термоэрозионные и склоново-обвальные процессы. Например, на участке Сюльдюкар – Сунтар его вклад оценен в 0,07–0,08 тысяч тонн на 1 погонный км или 50–55% продольного увеличения стока взвешенных наносов. Но как уже ранее подмечено, долина между Вилуйской ГЭС-1,2 и

Сюльдюкар ом узкая и беспойменная, русло чрезвычайно устойчивое, и здесь не было традиционного заметного вреза русла в условиях искусственно созданного дефицита наносов [Беркович и др., 1987]. Нельзя забывать и об ошибках измерений стока воды и наносов на постах, которые достоверно в отношении рассматриваемых постов нам неизвестны, но могут быть очень большими. Учитывая все выше сказанное, наиболее вероятный диапазон значений для годового стока наносов реки Виллой у плотины Виллойской ГЭС-1,2 составляет от 80 до 90 тысяч тонн или 40–45% суммарного притока речных наносов в водохранилище.

Это не согласуется с оценками, получаемыми расчетными способами. По формуле Б.И. Новикова, предложенной для равнинных водохранилищ России и Украины [Денисова и др., 1987]:

$$K_{yn} = 99,6 - 2,32 \frac{K_b L}{365} \quad (2)$$

где K_b – коэффициент условного водообмена водохранилища;

L – длина водохранилища, км;

мы получим, что 98% речных наносов останутся в водохранилище, 2% будут сброшены в нижний бьеф. По известной формуле Дж. М. Бруна [Brune, 1953; Vörösmarty et al., 2003]:

$$TE = 1 - \frac{0,05}{\sqrt{D_{SR}}} \quad (3)$$

где TE – наносоудерживающая способность, %;

D_{SR} – период условного водообмена, год;

мы получим наносоудерживающую способность равную 96%.

То есть для водохранилищ:

- 1) с небольшим объемом речных наносов в балансе наносов, формируемым реками с очень малой мутностью воды;
- 2) со своеобразной структурой наносов в приплотинной части водохранилища, в которой, вероятнее всего, многократно преобладают мелкие взвеси, образующиеся от размыва берегов и органического происхождения;
- 3) с очень сложной конфигурацией и большой протяженностью;

итоги расчетов по формулам (2) или (3) могут вполне быть правдоподобными и отражать ситуацию с удержанием именно речных наносов, но отличаться от данных наблюдений на постах в нижнем бьефе из-за поступления в него мелких взвесей абразивного, термоабразивного и денудационного генезиса.

Вниз по течению от Виллойской ГЭС-1,2, как ранее отмечено, мутность воды и сток наносов постепенно увеличиваются, но не достигают прежних значений, несмотря на выросшую водность главной реки и ее притоков, по сравнению с периодом до 1967–1976 годов (таблица 1). До поста Сюльдюкар колебания мутности воды небольшие, в пределах точности измерений. С 2004 года основную часть этого участка занимает русловое водохранилище Светлинской ГЭС, верхний бьеф которой простирается вплоть до плотины Виллойской ГЭС-1,2 – на 141 км. По итогам экспедиции в августе 2021 года мутность воды по длине этого участка (до устья реки Малая Ботубия), при меженных расходах воды притоков увеличивается в 1,3–1,5 раза, с положительными и такими же отрицательными отклонениями от среднего диапазона 2–2,5 NTU без устойчивых закономерностей.

От поста Сюльдюкар до поста Сунтар, на котором также осуществляют мониторинг за расходами и мутностью воды, реку Виллой, как ранее отмечено, объединяет 2 участка – с ограничениями по эрозии русла и берегов (примерно до поста Виллочан) и более благоприятными условиями: от поста Виллочан до поста Сунтара и далее – до устья реки Марха. Мутность воды притоков, суммарный сток воды которых около 2,8 км³/год, примерно такая же, как и на вышележащем участке. Поэтому, несмотря на его большую протяженность (~410 км), увеличение средней многолетней мутности небольшое – до 6 г/м³ (и немногим более) против 18 г/м³ в период с 1957 по 1966 год (таблица 1). С зарегулированием реки Виллой сток взвешенных наносов на посту Сунтар уменьшился с 490 до 165 тысяч тонн в год. И если раньше доля половодья достигала 96%, то в зарегулированных условиях она снизилась в

среднем до 80%. Важным изменением стало увеличение на порядок стока наносов зимней межени, который ранее практически был равен нулю.

По экспедиционным данным августа 2021 года примерно через 325 км от Вилуйской ГЭС-1,2 условия пополнения взвесей в речном потоке улучшаются и к постам Крестях и Сунтар мутность воды возрастала до 4,5–5,0 NTU, то есть почти в 2 раза и больше. По глубине речного потока мутность закономерно растет – в нашем случае в 1,1–1,5 раз.

От поста Сунтар к посту Хатырык-Хомо (расстояние 620 км) сток наносов и мутность воды увеличиваются в несколько раз за счет поступления наносов многоводных притоков, а также размыва русла и эрозии берегов, особенно ниже устья реки Марха. Тем не менее прежних значений они не достигают. В итоге на замыкающем створе реки Вилуй мутность воды составила 39 и 24 г/м³ в первый и третий периоды соответственно (таблица 1), сток взвешенных наносов – 1 960 и 1 290 тысяч тонн в год; доля половодья уменьшилась с 93 до 85%. То есть разность между естественной и нарушенной величинами стока наносов к устью реки Вилуй лишь увеличивается, и задержание наносов водохранилищами явно не главная причина. Вероятнее всего, повлияло резкое уменьшение максимальных расходов воды половодья (на 40 и 20% на постах Сунтар и Хатырык-Хомо) и их руслоформирующего потенциала. Кроме того, согласно [Беркович и др., 1987], изменилась длительность и величина взаимного подпора нижнего течения реки Вилуй и его крупных притоков. Так, величина подпора со стороны реки Марха увеличилась до 3,2 м (была 2 м), а длина подпорной зоны – до 118 км (было 67,2 км). На участке подпора скорости течения реки Вилуй резко снижаются, создаются условия для выпадения влекомых наносов и крупных взвесей, превращения несложных перекатов в лимитирующие, как это случилось с перекатами Крахмальный, Мархинский и Крохалиный [Руднев, Рудых, 1987].

В многолетнем плане явно видна тенденция к уменьшению мутности воды не только на

зарегулированном участке реки Вилуй, но и для незарегулированных рек (рисунок 6). Эта уникальная ситуация, обнаруженная на ~74% постов на реках арктического водосбора азиатской территории России с мониторингом стока наносов (из рассмотренных 165 постов) [Магрицкий, 2020], парадоксальная и пока не поддается объективному объяснению. Ведь водность рек азиатской территории России в большинстве случаев в период с 1980 по 1990-е годы выросла [Многолетние колебания..., 2021; Фролова и др., 2022], как и расходы воды летне-осеннего сезона, что должно было повлиять соответствующим образом на интенсивность и пространственный охват термоэрозии и другое. Пока ответ не найден, эти результаты заставляют с осторожностью использовать данные сетевых наблюдений за наносами, начиная с середины 1990-х годов.

Стоковые, термические и гидрохимические условия во время первой экспедиции

Во время первой экспедиции получено, что температура воды в Вилуйском водохранилище, как важный фактор термоэрозионных, гидрохимических и гидроэкологических внутриводоемных процессов, закономерно уменьшается с глубиной – с 15,5–18°C до 7,7–9°C и меньше. В Светлинском водохранилище прямая температурная стратификация по глубине не столь контрастная – от 16,6 до 11,8°C. Речные воды более перемешаны и с удалением от водохранилищ лучше прогреваются.

Воды водохранилища нейтральные (рН от 7 до 7,5), порой с переходом в слабощелочные в глубоких горизонтах. Речные воды слабощелочные, но в притоках могут возникать гидрохимические аномалии. В первую очередь они связаны с увеличением минерализации вод из-за антропогенного воздействия или разгрузки подземных вод. Наиболее показательный пример – это величина электропроводности в устье реки Малая Ботуобия равная 706 мкСм/см при средней в Вилуйском водохранилище 85–95 мкСм/см, в Светлинском водохранилище и у плотины Светлинской ГЭС – 85–110 мкСм/см, у Крестях и Сунтара – 100–130 мкСм/см. Причем электропроводность

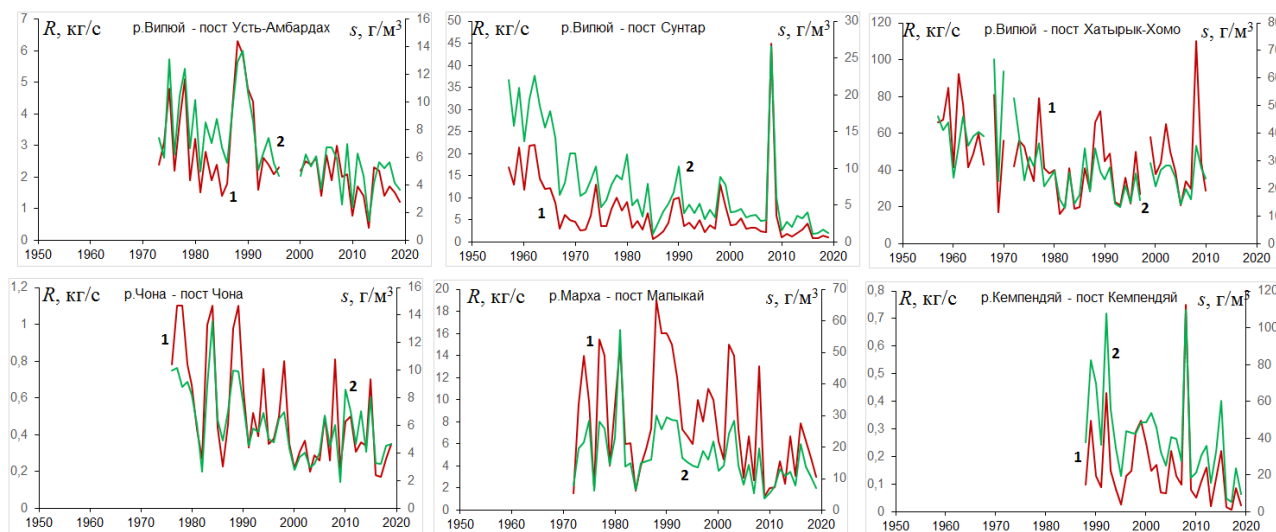


Рисунок 6. Многолетние колебания среднегодовых расходов взвешенных наносов (1) и мутности воды (2) рек в бассейне реки Вилюй

Figure 6. Long-term fluctuations in the average annual discharge of suspended sediment (1) and turbidity of water (2) of rivers in the basin of the Vilyuy River

по длине нижнего бьефа и с глубиной увеличивается, что связано с выходом более соленых подземных вод, особенно в таликовых зонах.

Обнаружена стоковая аномалия в реке Малая Ботуобия, расход воды в которой многократно уменьшается от поселка Новый (в окрестностях города Мирный) к устью – от 10–12 до 3,5 м³/с, несмотря на впадение притоков на этом участке. Она пока не нашла своего объяснения.

Заключение

Величина и режим стока наносов реки Вилюй в его среднем и нижнем течении сильно изменены водохранилищами с середины 70-х годов XX века. Самое большое Вилюйское водохранилище (в 1 348 км от устья) регулирует 39% стока реки с 1974–1976 годов. В 141 км ниже расположена плотина Светлинской ГЭС (с 2004 года).

Согласно данным мониторинга на гидрологических постах влияние суточного и недельного регулирования водохранилищами уровней и расходов воды прослеживается соответственно на 300–400 и 700–850 км, а на сезонный и годовой сток – до устья реки Вилюй и дальше. С эксплуатацией Вилюйского водохранилища связано уменьшение

максимальных расходов (на 40 и 20% на постах Сунтар и Хатырык-Хомо соответственно) и стока половодья (на 53, 41 и 18% в створе ГЭС-1,2, на постах Сунтар и Хатырык-Хомо соответственно), рост расходов зимней межени в среднем на 650–700 м³/с, разнонаправленные изменения стока летне-осенней межени – в первой и второй ее половине.

Уменьшение максимального стока и осаждение наносов в водохранилищах заметно сократили сток наносов реки Вилюй. И этот эффект сохраняется до впадения в реку Лена. О характере этих изменений ранее можно было судить лишь по данным мониторинга на постах Сунтар и Хатырык-Хомо. В августе – сентябре 2021 года состоялись две экспедиции с измерениями в верхнем и нижнем бьефах вилюйских водохранилищ мутности и расходов воды, с отбором взвесей на гранулометрический и химический состав. Они были сопоставлены не только с данными сетевых наблюдений, но и с материалами спутниковой съемки с Landsat-8 от 19 и 28 августа и 13 сентября 2021 года. Получены связи между параметрами яркости пикселей снимка и весовой мутностью воды.

Оказалось, что результат воздействия водохранилищ на сток наносов неоднозначный и не согласуется с полуэмпирическими моделями

Новикова и Бруна. Согласно балансовым расчетам в Вилуйское водохранилище поступает ~200 тысяч тонн взвешенных наносов год. Сброс в нижний бьеф равен 80–90 тысяч тонн в год или 40–45% притока. Тогда как по формулам наносодержащая способность такого водохранилища близка к 98 и 96%. Причина серьезных расхождений, вероятнее всего, во взвесах, образующихся при размыве берегов и органического происхождения, вклад которых многократно возрастает для водохранилищ с незначительным притоком речных наносов.

Большая часть речных наносов, поступающих в Вилуйское водохранилище, откладывается на концевых участках рек (в зоне подпора) и на приустьевых акваториях водоема. Здесь, согласно данным натурных измерений в 2021 года и по спутниковому снимку, наибольшие значения средней мутности (~3,0–3,4 мг/л). К приплотинной части средняя мутность уменьшается до 2,2 мг/л. Резкие повышения мутности фиксируются в береговой зоне и небольших заливах (до 40 мг/л), связанные с размывом берегов и ветро-волновым взмучиванием в мелководной береговой зоне. В поверхностном слое приплотинной части водохранилища мутность увеличивалась (в августе 2021 года) в 1,1–1,5 раза по глубине и незначительно к берегам и мелководьям.

От плотины Вилуйского водохранилища к посту Сюльдюкар годовой сток наносов увеличивается до 115 тысяч тонн, к Сунтару – до 165 тысяч тонн, тогда как в естественных условиях он составлял 490 тысяч тонн в год. Слабое восстановление потока наносов объясняется ограничениями для эрозионной

активности, которые ослабевают с 325 км ниже плотины, и особенно ощутимо ниже устья реки Марха. Мутность притоков мала (~8 г/м³); вклад эрозионных процессов в восстановление стока наносов оценен в 50–55% нарастания стока от поста Сюльдюкар к посту Сунтар. На посту Хатырык-Хомо, мутность составила 39 и 24 г/м³ до 1967 года и с 1976 года соответственно, сток взвешенных наносов – 1 960 и 1 290 тысяч тонн в год; доля половодья сократилась с 93 до 85%. То есть разность между естественным и нарушенным стоком взвешенных наносов к устью реки Вилуй увеличивается, поскольку помимо задержания наносов водохранилищами, начинает «работать» нарушение ими водного режима реки и новые условия гидравлического сопряжения с крупными притоками.

В многолетнем плане явно видна тенденция к уменьшению мутности воды не только на зарегулированном участке реки Вилуй, но и у рек, находящихся в естественных условиях. Причина этого пока своего объяснения не находит.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00181. Отдельная благодарность Вилуйской научно-исследовательской мерзлотной станции института мерзловедения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук и озерной станции «Чернышевский» Якутского Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Литература

Беркович К.М., Зайцев А.А., Чалов Р.С., Чернов А.В. Влияние гидроузла на развитие русла и поймы реки Вилуя в среднем и нижнем течении // Сборник научных трудов «Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях крайнего Севера». Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. С. 12–18.

Бурлаков В.М. Районирование Вилуйского водохранилища. Типизация и классификация его

References

Berkovich K.M., Zaitsev A.A., Chalov R.S., Chernov A.V. Vliyanie gidrouzla na razvitie rusla i поймы реки Vilyuya v srednem i nizhnem techenii [The influence of the hydroelectric complex on the development of the riverbed and floodplain of the Vilyuya River in the middle and lower reaches]. Vliyanie GES na okruzhayushchuyu sredu v usloviyakh krainego Severa: Sbornik nauchnykh trudov [The impact of hydroelectric power plants on

берегов // Сборник научных трудов «Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях крайнего Севера». Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. С. 34–42.

Великин С.А., Соболев И.С., Соболев С.В., Хохлов Д.Н. Результаты инструментальных наблюдений и адаптивного прогноза термоабразии берегов Вилюйского водохранилища // Гидротехническое строительство. 2013. № 6. С. 2–8.

Вода России. Речные бассейны / Научный редактор А.М. Черняев. Екатеринбург: АКБА-ПРЕСС, 2000. 536 с.

Водные пути бассейна Лены / Под общей редакцией Р.С. Чалова, В.М. Панченко, С.Я. Зернова. М.: МИКИС, 1995. 600 с.

Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наукова думка, 1987. 164 с.

Захарова Т.Г. Изменение качества речных вод в результате развития горнодобывающих предприятий // Сборник научных трудов «Антропогенное воздействие на водные ресурсы Якутии». Якутск: ЯФСО АН СССР, 1984. С. 36–39.

Константинов И.П. Динамика берегов водохранилища Вилюйской ГЭС в период наполнения и начальной эксплуатации // Береговые процессы в криолитозоне / Сборник статей. Новосибирск: Наука, 1984. С. 38–50.

Кудояров Л.И., Оникиенко Т.С. Влияние изменений мерзлотных условий в чаше водохранилищ на функционирование северных ГЭС // Гидротехническое строительство. 1990. № 2. С. 8–11.

Магрицкий Д.В. Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев рек Восточной Сибири. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2001. 25 с.

Магрицкий Д.В. Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Водные ресурсы. 2008. Т.35. № 1. С. 3–16.

the environment in the Far North: Proceedings of the Yakut branch of the USSR Academy of Sciences]. Yakutsk, 1987, pp. 12–18. (In Russian).

Brune G.M. Trap Efficiency of Reservoirs. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1953, vol. 34, iss. 3, pp. 407–418. DOI: [10.1029/TR034i003p00407](https://doi.org/10.1029/TR034i003p00407).

Burlakov V.M. Raionirovanie Vilyuyskogo vodokhranilishcha. Tipizatsiya i klassifikatsiya ego beregov [Zoning of the Vilyuy reservoir. Typification and classification of its shores]. *Vliyanie GES na okruzhayushchuyu sredu v usloviyakh krainego Severa: Sbornik nauchnykh trudov* [The impact of hydroelectric power plants on the environment in the Far North: Proceedings of the Yakut branch of the USSR Academy of Sciences]. Yakutsk, 1987, pp. 34–42. (In Russian).

Chalov S.R., Potemkina T.G., Pashkina M.P., Kasimov N.S. Evolution of suspended sediment budget in the deltas of Lake Baikal tributaries. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 44, iss. 10, pp. 667–673. DOI: [10.3103/S1068373919100042](https://doi.org/10.3103/S1068373919100042). (Russ. ed.: Chalov S.R., Potemkina T.G., Pashkina M.P., Kasimov N.S. Mnogoletnie izmeneniya balansa vzveshennykh nanosov v del'takh pritokov Baikala. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2019, iss. 10, pp. 50–59).

Chalov S.R., Prokopeva K.N. Assessment of Suspended Sediment Budget of the Lena River Delta Based on the Remote Sensing Dataset. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, iss. 9, pp. 1051–1060. DOI: [10.1134/S0001433821090450](https://doi.org/10.1134/S0001433821090450).

Chalov S., Prokopeva K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 22, 4549. DOI: [10.3390/rs13224549](https://doi.org/10.3390/rs13224549).

Chavez Jr. P.S. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, vol. 62, iss. 9. Pp. 1025–1036.

Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. № 5. С.69–77.

Магрицкий Д.В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2010. № 6. С.17–24.

Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 6. С.85–95.

Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности пространственной и многолетней изменчивости поступления речных наносов в моря Российской Арктики // Вопросы географии. 2016. Сб. 142: География полярных регионов. С.444–466.

Магрицкий Д.В. Аспекты влияния эксплуатации вилюйских водохранилищ на гидрологический режим среднего и нижнего Вилюя // Труды VI Международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (г. Пермь, 29 мая – 1 июня 2017 г.): в 3 т. Т.1: Гидро- и геодинамические процессы. Управление водными ресурсами. Пермь: ПГНИУ, 2017. С. 99–104.

Магрицкий Д.В. Климатически обусловленные и антропогенные изменения стока взвешенных наносов главных арктических рек Сибири и Дальнего Востока РФ // Труды IV Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» (МГО 2020) имени Л.Н. Карлина (г. Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2020). СПб.: Химиздат, 2020. С.248–253.

Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек: учебник. М.: Изд-во МГУ, 1998. 176 с.

Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: научно-прикладной справочник / Под редакцией

Chistyakov G.E. *Vodnye resursy rek Yakutii* [Water resources of the rivers of Yakutia]. Moscow, Publ. Nauka, 1964. 255 p. (In Russian).

Chzhan R.V. Opyt stroitel'stva gidrotekhnicheskikh sooruzhenii v Yakutii i izmenenie inzhenerno-geologicheskikh uslovii territorii pod vliyaniem gidrouzlov i menyayushchegosya klimata [Experience in the construction of hydraulic structures in Yakutia and changes in the engineering and geological conditions of the territory under the influence of hydroelectric facilities and changing climate]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam XV mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Nauchnyi dialog: Voprosy tochnykh i tekhnicheskikh nauk»* (Sankt-Peterburg, 12 marta 2018 g.) [Proceedings of Fifteenth International scientific practical conference "Scientific trends: issues of exact and technical sciences" (Saint-Petersburg, Russia, March 12, 2018)]. Saint-Petersburg, Publ. 2018, pp. 25–39. (In Russian). DOI: [10.18411/spc-12-03-2018-09](https://doi.org/10.18411/spc-12-03-2018-09).

Denisova A.I., Nakhshina E.P., Novikov B.I., Ryabov A.K. *Donnye otlozheniya vodokhranilishch i ikh vliyanie na kachestvo vody* [Bottom sediments of reservoirs and their impact on water quality]. Kiev, Publ. Naukova dumka, 1987. 164 p. (In Russian).

Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data. *Water Resources*, 2022, vol. 49, iss. 3, pp. 333–350. DOI: [10.1134/S0097807822030046](https://doi.org/10.1134/S0097807822030046). (Russ. ed.: Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gel'fan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stok rek Rossii pri proiskhodyashchikh i prognoziruemykh izmeneniyakh klimata: obzor publikatsii. 1. Otsenka izmenenii vodnogo rezhima rek Rossii po dannym nablyudenii. *Vodnye resursy*, 2022, vol. 49, iss. 3, pp. 251–269. DOI: [10.31857/S032105962203004X](https://doi.org/10.31857/S032105962203004X)).

В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.

Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ: научно-прикладной справочник / Под редакцией В.Ю. Георгиевского. М.: ООО «РПЦ Офорт», 2017. 132 с.

Назаренко С.Н., Сахарова Н.Б. Изменение ледо-термического режима р.Виллой в нижнем бьефе Виллюйской ГЭС I–II // Гидротехническое строительство. 1982. № 8. С. 23–26.

Ноговицын Д.Д., Кусатов К.И. Анализ изменения режима реки Виллой после зарегулирования стока водохранилищем ГЭС // Антропогенное воздействие на водные ресурсы Якутии / Сборник научных трудов. Якутск: ЯФСО АН СССР, 1984. С.41–55.

Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. Том 17. Лено-Индигирский район. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 652 с.

Руднев А.С., Рудых В.Г. О судоходстве на реке Виллое ниже ГЭС // Сборник научных трудов «Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях крайнего Севера». Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. С.57–60.

Справочник водохранилищ СССР: в 2 ч. Часть 1. Водоохранилища объемом 10 млн м³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 323 с.

Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под общей редакцией А.В. Караушева. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 240 с.

Траппы Сибири и Декана: черты сходства и различия / Ответственный редактор Г.В. Полякова. Новосибирск: Наука, 1991. 216 с.

Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Том 49. Вып. 3. С. 251–269. DOI: [10.31857/S032105962203004X](https://doi.org/10.31857/S032105962203004X).

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 25, iss. 18, pp. 3651–3674. DOI: [10.1080/01431160310001647993](https://doi.org/10.1080/01431160310001647993).

Konstantinov I.P. Dinamika beregov vodokhranilishcha Vilyuyskoi GES v period napolneniya i nachal'noi ekspluatatsii [Dynamics of the banks of the reservoir of the Vilyuyskaya HPP during the filling and initial operation]. *Beregovye protsessy v kriolitozone: Sbornik statei [Coastal processes in permafros: Collection of articles]*. Novosibirsk, Publ. Nauka, 1984, pp. 38–50. (In Russian).

Kudoyarov L.I., Onikienko T.S. Vliyanie izmenenii merzlotnykh uslovii v chashe vodokhranilishch na funktsionirovanie severnykh GES [Influence of changes in permafrost conditions in the reservoir basin on the functioning of the Northern hydroelectric power stations]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*. 1990, iss. 2, pp. 8–11. (In Russian).

Magritskii D.V. *Estestvennye i antropogennye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima nizov'ev i ust'ev rek Vostochnoi Sibiri. Avtoref. diss. kand. geogr. nauk [Natural and anthropogenic changes in the hydrological regime of the lower reaches and estuaries of the rivers of Eastern Siberia. Ph. D. (Geography) Thesis]*. Moscow, Publ. Lomonosov MSU, 2001. 25 p. (In Russian).

Magritskii D.V. Anthropogenic impact on the runoff of Russian rivers emptying into the Arctic Ocean. *Water Resources*, 2008, vol. 35, iss. 1, pp. 1–14. DOI: [10.1007/s11268-008-1001-2](https://doi.org/10.1007/s11268-008-1001-2). (Russ. ed.: Magritskii D.V. Antropogennye vozdeistviya na stok rek, vpadayushchikh v morya Rossiiskoi Arktik. *Vodnye resursy*, 2008, vol. 35, iss. 1, pp. 3–16).

Magritskii D.V. Teplovoi stok rek v morya Rossiiskoi Arktiki i ego izmeneniya [Heat runoff to the Russian Arctic seas and its changes]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography]*, 2009, iss. 5, pp. 69–77. (In Russian; abstract in English).

Чалов С.Р., Потемкина Т.Г., Пашкина М.П., Касимов Н.С. Многолетние изменения баланса взвешенных наносов в дельтах притоков Байкала // Метеорология и Гидрология. 2019. № 10. С. 50–59.

Чистяков Г.Е. Водные ресурсы рек Якутии. М.: Наука, 1964. 255 с.

Чжан Р.В. Опыт строительства гидротехнических сооружений в Якутии и изменение инженерно-геологических условий территории под влиянием гидроузлов и меняющегося климата // Сборник научных трудов по материалам XV международной научной конференции «Научный диалог: Вопросы точных и технических наук» (г. Санкт-Петербург, 12 марта 2018 г.). СПб.: Изд. ЦНХ МОАН, 2018. С. 25–39. DOI: [10.18411/spc-12-03-2018-09](https://doi.org/10.18411/spc-12-03-2018-09).

Brune G.M. Trap Efficiency of Reservoirs // Eos, Transactions American Geophysical Union. 1953. Vol. 34. Iss. 3. Pp. 407–418. DOI: [10.1029/TR034i003p00407](https://doi.org/10.1029/TR034i003p00407).

Chalov S.R., Prokopeva K.N. Assessment of Suspended Sediment Budget of the Lena River Delta Based on the Remote Sensing Dataset // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. Vol. 57. Iss. 9. Pp. 1051–1060. DOI: [10.1134/S0001433821090450](https://doi.org/10.1134/S0001433821090450).

Chalov S., Prokopeva K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 22. 4549. DOI: [10.3390/rs13224549](https://doi.org/10.3390/rs13224549).

Chavez Jr. P.S. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. Vol. 62. Iss. 9. Pp. 1025–1036.

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs // International Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 25. Iss. 18. Pp. 3651–3674. DOI: [10.1080/01431160310001647993](https://doi.org/10.1080/01431160310001647993).

Magritskii D.V. Godovoi stok vzveshennykh nanosov rossiiskikh rek vodosbora Severnogo Ledovitogo okeana i ego antropogennye izmeneniya [Annual suspended matter flow of the Russian rivers belonging to the Arctic Ocean basin and its anthropogenic transformation]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2010, iss. 6, p.17–24. (In Russian; abstract in English).

Magritskii D.V. Faktory i zakonomernosti mnogoletnikh izmenenii stoka vody, vzveshennykh nanosov i teploty Nizhnei Leny i Vilyuya [Factors and trends of the long-term fluctuations of water, sediment and heat runoff of the lower reaches of the Lena River and the Vilyuy River]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography]*, 2015, iss. 6, pp. 85–95. (In Russian; abstract in English).

Magritskii 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 [Problems of Geography]*, 2016, vol. 142: *Geografiya polyarnykh regionov [Geography of Polar Regions]*, pp. 444–466. (In Russian; abstract in English).

Magritskii D.V. Aspekty vliyaniya ekspluatatsii Vilyuyskikh vodokhranilishch na gidrologicheskii rezhim srednego i nizhnego Vilyuya [Aspects of the impact of operation of the Vilyuy reservoirs on the hydrological regime of the middle and lower Vilyuy]. *Trudy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov» (Perm', 29 maya – 1 iyunya 2017 g.): v 3 t. T.1: Gidro- i geodinamicheskie protsessy. Upravlenie vodnymi resursami [Proceedings of the Sixth International scientific practical conference "Current issues of reservoirs and their catchment areas" (Perm, May, 29 – June, 1, 2017) in 3 vol. Vol.1: Hydro- and geodynamics processes. Water resources management]*. Perm, Publ. of Perm State University, 2017, p. 99–104. (In Russian; abstract in English).

Miller R.L., Cruise J.F. Effects of suspended sediments on coral growth: evidence from remote sensing and hydrologic modeling // *Remote Sensing of Environment*. 1995. Vol. 53. Iss. 3. Pp. 177–187. DOI: [10.1016/0034-4257\(95\)00081-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00081-B).

Vörösmarty C.J., Meybeck M., Fekete B., Sharma K., Green P., Syvitski J.P.M.M. Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments // *Global and Planetary Change*. 2003. Vol. 39. Iss. 1–2. Pp. 169–190. DOI: [10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7).

Magritskii D.V. Klimaticheski obuslovlennyye i antropogennyye izmeneniya stoka vzveshennykh nanosov glavnykh arkticheskikh rek Sibiri i Dal'nego Vostoka Rossiiskoi Federatsii [Climate-related and anthropogenic changes in suspended sediment runoff of the main Arctic rivers of Siberia and the Russian Far East]. *Trudy IV Vserossiiskoi konferentsii «Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya» (MGO 2020) imeni L.N. Karlina (Sankt-Peterburg, 16–17 dekabrya 2020) [Proceedings of the Fourth Russian national conference “Hydrometeorology and ecology: scientific and educational achievements and perspectives” /MGO 2020 named after L.N. Karlin (St. Petersburg, December, 16–17, 2020)]. Saint-Petersburg, Publ. Khimizdat, 2020, pp. 248–253. (In Russian; abstract in English).*

Mikhailov V.N. *Gidrologiya ust'ev rek: uchebnik [Hydrology of river mouths: textbook]*. Moscow, Publ. MGU, 1998. 176 p. (In Russian; abstract in English).

Miller R.L., Cruise J.F. Effects of suspended sediments on coral growth: evidence from remote sensing and hydrologic modeling. *Remote Sensing of Environment*, 1995, vol. 53, iss. 3, pp. 177–187. DOI: [10.1016/0034-4257\(95\)00081-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00081-B).

Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of the flow of rivers in the Russian Federation: scientific and applied reference book] Georgievskiy V.Yu. (ed.). Saint-Petersburg, Publ. RIAL, 2021. 190 p. (In Russian).

Mnogoletnie kharakteristiki pritoka vody v krupneishie vodokhranilishcha Rossiiskoi Federatsii: nauchno-prikladnoi spravochnik [Long-term characteristics of water inflow into the largest reservoirs of the Russian Federation: scientific and applied reference book]. Georgievskiy V.Yu. (ed.). Moscow, Publ. Ofort, 2017. 132 p. (In Russian; abstract in English).

Nazarenko S.N., Sakharova N.B. *Izmenenie ledotermicheskogo rezhima r. Vilyuy v nizhnem b'efe Vilyuyskoi GES I–II [Changes in the ice-thermal*

regime of the Vilyuy River in the lower reaches of the Vilyuy HPP I-II]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic engineering]*, 1982, iss. 8, pp. 23–26. (In Russian).

Nogovitsyn D.D., Kusatov K.I. Analiz izmeneniya rezhima reki Vilyuy posle zaregulirovaniya stoka vodokhranilishchem GES [Analysis of changes in the regime of the Vilyu River after regulation of the flow by the hydroelectric power station]. *Antropogennoe vozdeistvie na vodnye resursy Yakutii: Sbornik nauchnykh trudov [Anthropogenic impact on the water resources of Yakutia: Proceedings]*. Yakutsk, 1984, pp. 41–55. (In Russian).

Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: v 20 t. Tom 17. Leno-Indigirskii raion [Surface water resources of the USSR: in 20 vol. Vol. 17. Leno-Indigirsky district]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1972. 652 p. (In Russian).

Rudnev A.S., Rudykh V.G. O sudokhodstve na reke Vilyue nizhe GES [About navigation on the Vilyu River below the hydroelectric power station]. *Vliyanie GES na okruzhayushchuyu sredu v usloviyakh krainego Severa: Sbornik nauchnykh trudov [The impact of hydroelectric power plants on the environment in the Far North: Proceedings of the Yakut branch of the USSR Academy of Sciences]*. Yakutsk, 1987, pp. 57–60. (In Russian).

Spravochnik vodokhranilishch SSSR v 2 ch. Chast' 1. Vodokhranilishcha ob'emom 10 mln m³ i bolee. [Reference book of reservoirs of the USSR: in 2 parts. Part 1. Reservoirs with a volume of 10 million m³ and more]. Moscow, Publ. Soyuzvodproekt, 1988, 323 p. (In Russian).

Stok nanosov, ego izuchenie i geograficheskoe raspredelenie [Sediment runoff, its study and geographical distribution]. Karaushev A.V. (ed.). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1977. 240 p. (In Russian).

Trappy Sibiri i Dekana: cherty skhodstva i razlichiya [Traps of Siberia and Deccan: similarities and differences]. Polyakov G.V. (ed.). Novosibirsk, Publ. Nauka, 1991. 216 p. (In Russian; abstract in English).

Velikin S.A., Sobol' I.S., Sobol' S.V., Khokhlov D.N. Results of instrument observations

and adaptive prediction of thermoabrasion of banks of the Vilyuy reservoir. *Power Technology and Engineering*, 2013, vol. 47, iss. 4, pp. 249–254. DOI: [10.1007/s10749-013-0432-3](https://doi.org/10.1007/s10749-013-0432-3). (Russ. ed.: Velikin S.A., Sobol' I.S., Sobol' S.V., Khokhlov D.N. Rezul'taty instrumental'nykh nablyudenii i adaptivnogo prognoza termoabrazii beregov Vilyuyskogo vodokhranilishcha. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2013, vol. 6, pp. 2–8).

Voda Rossii. Rechnye basseiny [Water of Russia. River basins]. Chernyaev A.M. (ed.). Ekaterinburg, Publ. AKVA-PRESS, 2000. 536 p. (In Russian).

Vodnye puti basseina Leny [Waterways of the Lena Basin]. Chalov R.S., Panchenko V.M., Zernov S.Ya. (eds.). Moscow, Publ. MIKIS, 1995. 600 p. (In Russian).

Vörösmarty C.J., Meybeck M., Fekete B., Sharma K., Green P., Syvitski J.P.M.M. Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 2003, vol. 39, iss. 1–2, pp. 169–190. DOI: [10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7).

Zakharova T.G. Izmenenie kachestva rechnykh vod v rezul'tate razvitiya gornodobyvayushchikh predpriyatii [Changes in the quality of river waters as a result of the development of mining enterprises]. *Antropogennoe vozdeistvie na vodnye resursy Yakutii: Sbornik nauchnykh trudov [Anthropogenic impact on the water resources of Yakutia: Proceedings]*. Yakutsk, 1984, pp. 36–39. (In Russian).