

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ
В ГИДРОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS
IN THE HYDROSPHERE OF THE EARTH

УДК 556.047

DOI: 10.34753/HS.2019.1.2.003

ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ ОБРАТНОГО
ТЕЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ СУХОНЫ В
ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

HYDROECOLOGICAL
FEATURES OF THE REVERSE
FLOW ON THE SUCHONA
RIVER DURING THE SPRING
FLUID

А.В. Белый

Anatoly V. Bely

*Вологодский государственный университет,**Vologda State University,**г. Вологда, Россия**Vologda, Russia*

bely.epir@yandex.ru

bely.epir@yandex.ru

Аннотация. Обратное течение реки Сухоны в районе её истока из озера Кубенское отмечается практически ежегодно. Формирование этого явления связано с особенностями ландшафта, морфологией русла и временной динамикой хода весеннего половодья реки Сухоны и её притоков. Целью исследования явилось выявление и оценка основных гидрологических и гидрохимических характеристик этого уникального явления.

Необходимость исследования обусловлена тем, что река Сухона в период обратного течения транспортирует в озеро Кубенское загрязнённые стоки крупных предприятий и городов. Для этого были решены следующие задачи:

Abstract. The annually reverse course of the Sukhona River, Northern Russia, is due to the features of the landscape, to the channel morphology, and to the time dynamics of spring flood of Sukhona and its tributaries. The evaluation of main hydrological and hydrochemical characteristics of this unique phenomenon is important practically because during the reverse flow the river transports the wastewater from enterprises and cities to its source from Lake Kubenskoye.

A number of results have been got: — the hydrological regime of Sukhona and of its upper tributaries obtained from

— собрана и проанализирована информация по гидрологическому, уровенному и гидрохимическому режиму реки Сухоны и её верхних притоков – рек Вологды и Лежи;

— выявлены основные факторы обратного течения в верховьях реки Сухоны в период весеннего половодья и выполнены гидрологические расчёты;

— дана статистическая оценка показателей жидкого и твёрдого стока во время противотечения;

— выполнен гидродинамический расчёт дальности проникновения загрязнённых вод обратного стока в озеро Кубенское;

— дана оценка гидрохимических показателей качества вод Верхней Сухоны и южной акватории озера Кубенское в период обратного течения;

— оценены возможные изменения качества вод озера Кубенское и риски, связанные с рассматриваемым явлением.

Решению этих задач способствовало получение гидрологической информации на водомерных постах на Верхней Сухоне, что позволило выполнить расчёты гидрологических характеристик обратного стока. Методами математической статистики выполнено приведение рядов наблюдений к многолетнему периоду, что дало возможность получить следующие показатели обратного стока: продолжительности, расходов и объёмов воды, скоростей течения, объёмов русловых наносов заданной повторяемости.

every provided issues;

— the main factors of the reverse flow have been revealed and the hydrological computations have been carried out;

— the statistical evaluation for the main indexes of solid and liquid flow during the reverse course has been provided;

— the hydrodynamic calculation for the distance of ingress of polluted waters into Lake Kubenskoye has been elaborated;

— the hydrochemical indexes of the water quality have been provided;

— the possible changes of water quality of Lake Kubenskoye and the risks of its pollution were considered.

The unique hydrological information from newly established water-measuring points enabled the valid estimation for the hydrological and hydraulic characteristics of the reverse course. The setting of observation sequences to the multi-year period have been made by statistical methodics and correlation analyze. The obtained empirical relationships can set up the prerequisites of a comprehensive forecast model for consequences of the reverse flow. The basic factors for pollution of waters of Sukhona have been revealed and the probability of pollution of Lake Kubenskoye, used for the water

Также оценена вероятность загрязнения озёрных вод, используемых для водоснабжения областного центра – города Вологды, сформулированы выводы и рекомендации по снижению риска негативных последствий обратного стока реки Сухоны в период весеннего половодья.

Ключевые слова: река Сухона; озеро Кубенское; сток; обратное течение; загрязнение; гидроэкосистема; гидрохимия; гидрологические характеристики

supplying of the regional center Vologda, was estimated too. Under that, the conclusions and recommendations for risk reducing of the negative hydro-ecological after-effects of the reverse flow have been formulated.

Keywords: Sukhona River; Lake Kubenskoye; river flow; reverse flow; pollution; hydroecological; hydrochemistry; hydrological characteristics

Введение

В период весеннего половодья река Сухона – примерно от истока до деревни Устье-Вологодское – на некоторое время меняет своё течение на противоположное. Это, в большей или меньшей степени, происходит практически ежегодно.

Весной, в начале подъёма уровней воды и в начале ледохода, течение реки Сухона вдруг останавливается, и река в течение суток поворачивает своё течение вспять, в озеро Кубенское. Обратный ход реки может продолжаться неделю, и больше. Удивительное зрелище, когда взмученные воды Сухоны, довольно грязные, начинают окрашивать белоснежный ледовый покров озера, а на входе в озеро начинают громоздиться серые льдины, вынесенные с промышленной зоны города Сокола.

Обратное течение реки Сухоны в озеро Кубенское можно было бы назвать интересным природным явлением, если бы не некоторые его негативные стороны.

Главным риском ухудшения качества водных ресурсов является то, что вместе с тальми водами в озеро Кубенское могут попадать загрязнённые воды с территорий и промышленных предприятий городов Вологды и Сокола.

В контексте рассматриваемой тематики следует отметить, что в силу дефицита водных ресурсов, необходимых для снабжения города Вологды, озеро Кубенское является главным источником питьевого и технического водоснабжения областного центра в маловодные, критические периоды года. Качество вод указанного водоёма должно быть не ниже уровня требований для объектов водоснабжения рыбохозяйственной категории.

В этой связи целью настоящего исследования является детальная количественная оценка и прогноз основных гидрологических, гидрохимических характеристик противотечения реки Сухоны во время весеннего половодья.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- провести сбор и анализ информации по гидрологическому, уровенному и гидрохимическому режиму реки Сухоны и её верхних притоков – рек Вологды и Лежи во всех имеющихся источниках;
- выявить основные факторы обратного течения в верховьях реки Сухоны в период весеннего половодья и выполнить гидрологические расчёты;
- дать статистическую оценку основных показателей жидкого и твёрдого стока во время противотечения;
- выполнить гидродинамический расчёт дальности проникновения загрязнённых вод обратного стока в озеро Кубенское;
- дать оценку гидрохимических показателей качества вод Верхней Сухоны и южной акватории озера Кубенское в период обратного течения;
- оценить возможные изменения качества вод озера Кубенское и возможные риски в связи с рассматриваемым явлением.

Объект исследования

Особенностью озера Кубенского является широко известный факт возникновения обратного течения реки Сухоны во время весеннего половодья. Качественная оценка и описание процесса противотечения и его движущих факторов отмечается во многих работах¹ [Ильинский, 1928; Филенко, 1966; Ресурсы поверхностных вод, 1972; Кириллова, 1974; Ильина, Грахов, 1987].

Месторасположение исследуемого региона показано на ситуационном плане (рисунок 1).

¹ Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.
Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1994. 176 с.

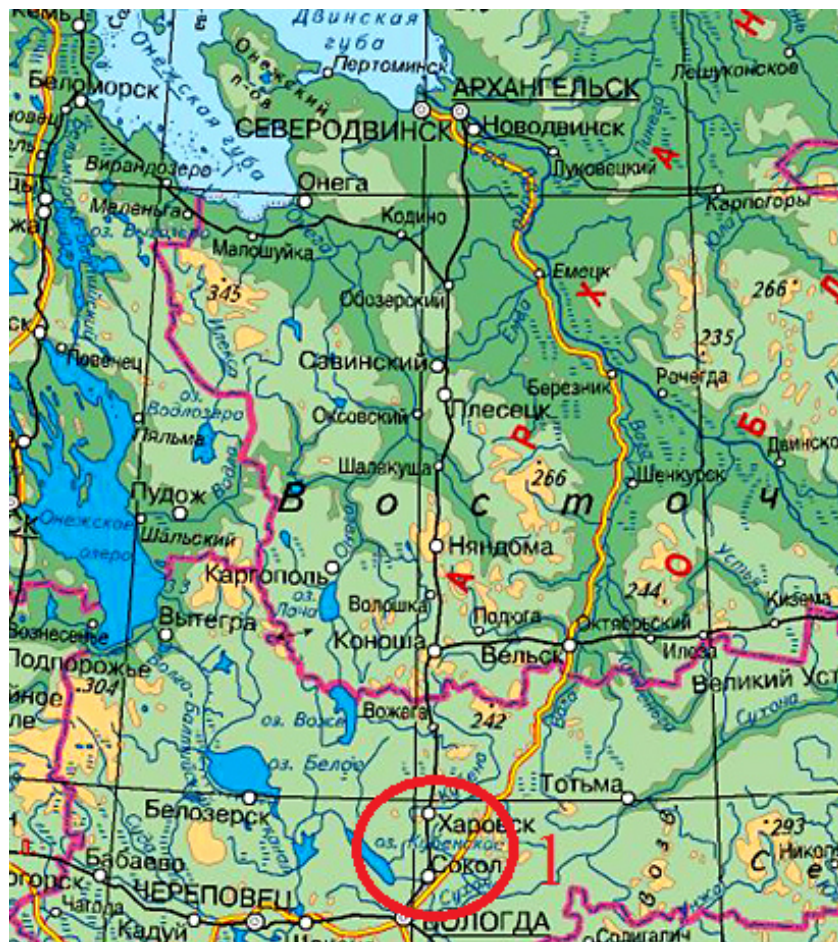


Рисунок 1. Ситуационный план месторасположения территории (1) исследуемого объекта²

Figure 1. Situational plan for the location (1) of the investigated object

Объектом исследования является гидрологический режим водотоков в пределах гидрографической сети Верхней Сухоны (рисунок 2) в период обратного стока реки, приуроченного к весеннему половодью.

Авторы отмечают, что основной причиной обратного стока являются:

- 1) особенности рельефа исследуемой территории, сформировавшиеся в процессе позднечетвертичного послеледникового периода;
- 2) существенная асинхронность в прохождении весеннего половодья на основных водотоках, питающих Кубенское озеро.

Гидрографическая сеть рассматриваемой территории претерпела в геологической истории сильные изменения во время московской и валдайской стадий оледенения и последующей деградации ледников.

² Географический атлас мира. М.: Ультра ЭКСТЕНТ фирма АРБАЛЕТ, 2008. 248 с.

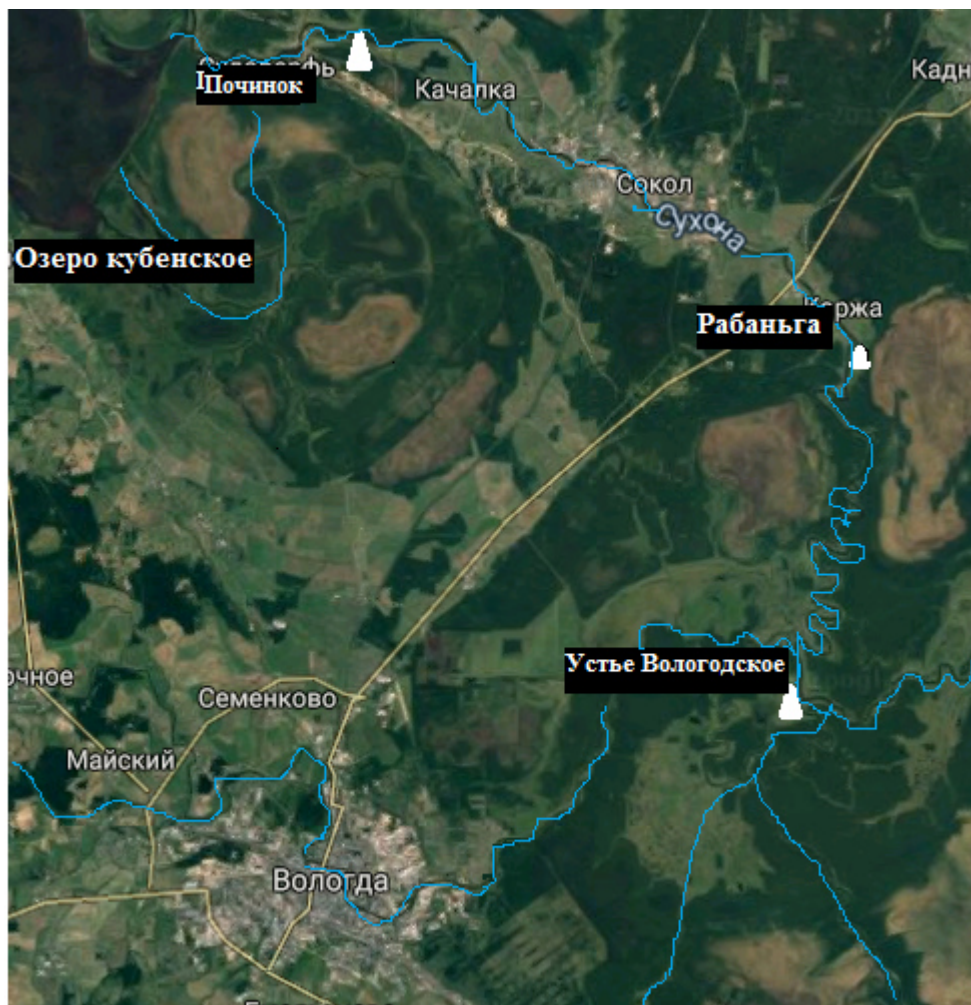


Рисунок 2. Космоснимок части водосбора реки Верхняя Сухона, южной акватории озера Кубенское и устьевой части реки Лежа. Источник: <https://www.google.com/maps>

Figure 2. Satellite photo of the uppermost part of the Sukhona River and its watershed, the southern part of Lake Kubenskoye and the estuary of the Lezha River.

Source of information: <https://www.google.com/maps>

Как отмечает Р.И. Филенко [Филенко, 1966] «...что касается современной долины реки Сухоны, то она в послеледниковый период не оставалась постоянной. По мнению геологов, в послеледниковый период были две Сухоны: Западная Сухона, впадающая в Кубенское озеро, верховьями которой служила река Уфтюга, а небольшая часть современной Сухоны ниже Уфтюги была лишь её притоком, и Восточная Сухона, протекавшая с запада на восток. Эти две реки разделялись плоско-возвышенным слабодренированным пространством. В процессе развития гидрографической сети, врезания и отступления верховьев Восточная Сухона соединилась с притоком древнего Кубенского озера... Восточная Сухона, имевшая более низкий базис эрозии (Белое море), перехватывала шаг за шагом все большую и большую

часть Западной Сухоны и спустила озеро, занимавшее Кубено-Сухонскую низину. Озеро (современное Кубенское) осталось лишь в её наиболее глубокой части бывшего озерно-ледникового водоёма».

На современных космоснимках поверхности исследуемого региона отчётливо просматривается осушённое ложе в южной части озера, опоясанное древним береговым валом. Видно, что Верхняя Сухона большей частью протекает по северной окраине Прикубенской низины. Протока Большой Пучкас протекает по дну этой котловины в центральной её части (рисунок 2).

Именно это обстоятельство обуславливает крайне низкие уклоны дна и, соответственно, свободной поверхности руслового потока реки Верхняя Сухона. Обычно они не превышают 0,0020-0,0040 в меженный период.

Об этом упоминается и в работе [Ильина, Грахов, 1987]: «... очертания речной долины на этом участке расплывчаты и неясны, местность вокруг плоская, болотистая, падение реки от истока до устья реки Вологды составляет всего несколько сантиметров на километр пути... Падение Средней Сухоны примерно на порядок выше, чем Рабаньгской. На 95-километровом участке от устья реки Ихалицы до города Тотьмы оно составляет 4,33 м, тогда как на протяжении 56 км Верхней Сухоны — всего 0,26 м... Из-за малого уклона русла в годы, когда Вологда и Лежа вскрываются раньше Кубенского озера, Сухона под напором их вод, бывает, поворачивает вспять. По неделе, а иногда и по две, течёт она к Кубенскому озеру, если на нем продолжает сохраняться низкий, меженный уровень воды». Авторы имеют в виду зимний меженный уровень, обычно устанавливающийся на озере к концу марта.

После створа д. Рабаньги река Сухона протекает по Присухонской низине и в районе створа д. Устье-Вологодское принимает справа два крупных притока – реку Вологду, несущую свои воды с юго-востока и реку Лежа, текущую в меридиональном, северном направлении. Водосборы этих притоков лежат на северном приводораздельном склоне большого водораздела Белого и Каспийского морей. Снеготаяние и водоотдача начинается на этих более южных водосборах на одну-две недели раньше, чем на основном притоке озера – реке Кубене. Водосбор реки Кубены расположен значительно севернее, её исток расположен в Архангельской области.

Рассмотрим более детально, с использованием основных гидрологических показателей, процесс обратного течения на участке гидрографической сети Верхней Сухоны от устья реки Вологды и реки Лежа до южной акватории Кубенского озера (рисунок 2).

Состояние проблемы и использованная информация

Основной проблемой, вызвавшей необходимость проведения исследований, является отсутствие информации о величине и порядке гидрологических и гидравлических параметров исследуемого явления приемлемой точности, достаточной для формулирования обоснованных выводов и принятия управленческих решений.

К проблеме можно отнести и отсутствие знаний о реальности риска ухудшения качества вод гидроэкосистемы южной акватории Кубенского озера вследствие обратного течения, а также об отсутствии достаточного информационного обоснования реальности этой угрозы.

Поскольку озеро Кубенское после строительства комплекса гидротехнических водозаборных сооружений является одним из источников питьевого и технического водоснабжения города Вологды, то это, безусловно, обуславливает большое жизненное значение озера для областного центра, и требует детального исследования его гидроэкологических и водохозяйственных особенностей (рисунок 3).

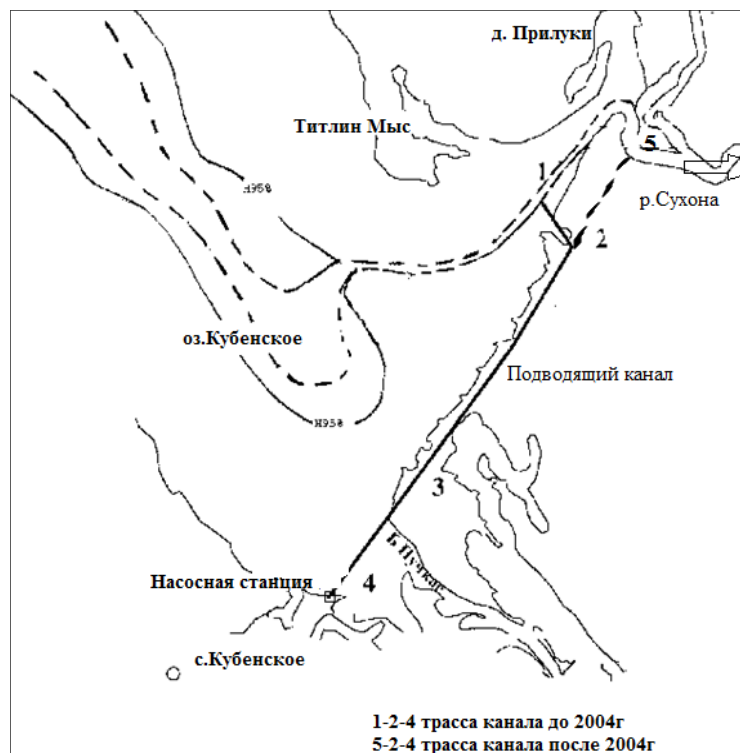


Рисунок 3. Ситуационный план месторасположения подводящего канала насосной станции водоподачи в город Вологду

Figure 3. Plan for the location of the inlet channel of the water supply pumping station in the city of Vologda

Гидрометеорологическая информация, использованная в настоящем исследовании, складывается из данных наблюдений по сети метеорологических и гидрологических станций Северного управления гидрометслужбы (СУГКС), данных наблюдений на ведомственных постах [Ресурсы поверхностных вод, 1972], и результатов полевых измерений, полученных в рамках научно-исследовательских работ при участии автора³.

В частности, соответствующие расчёты и анализ основных гидрологических и гидравлических характеристик процесса обратного течения реки Верхней Сухоны с использованием методов математической статистики стали возможными благодаря выполненным проектно-изыскательским институтом «Вологдаинжпроект» в течение 1981-1986 гг. уникальным полевым гидрометрическим измерениям в створах: река Сухона – д. Починок, д. Устье-Вологодское, река Лежа – д. Лобково. Эти посты были открыты в рамках обширных проектно-изыскательских работ для разработки технико-экономического обоснования «Проекта переброски части стока северных рек в бассейн реки Волга».

Использованы материалы наблюдений СУГКС на реке Сухоне у д. Рабаньга, а также данные по уровням воды на водомерном посту река Сухона – шлюз Знаменитый Вологодского района водных путей. Это пост с самой большой (более 100 лет) продолжительностью ряда наблюденных величин уровней воды [Ресурсы поверхностных вод, 1972].

Расположение опорных водомерных постов, данные по которым легли в основу исходной информации при исследовании, показано на рисунке 4.

³ Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.

Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1994. 176 с.

Определение возможности поступления стоков животноводческого комплекса «Дубровское» в водовод Кубенское-Вологда через грунтовые воды: отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый Вологда: МП «ЭПИР», 1991. 50 с.

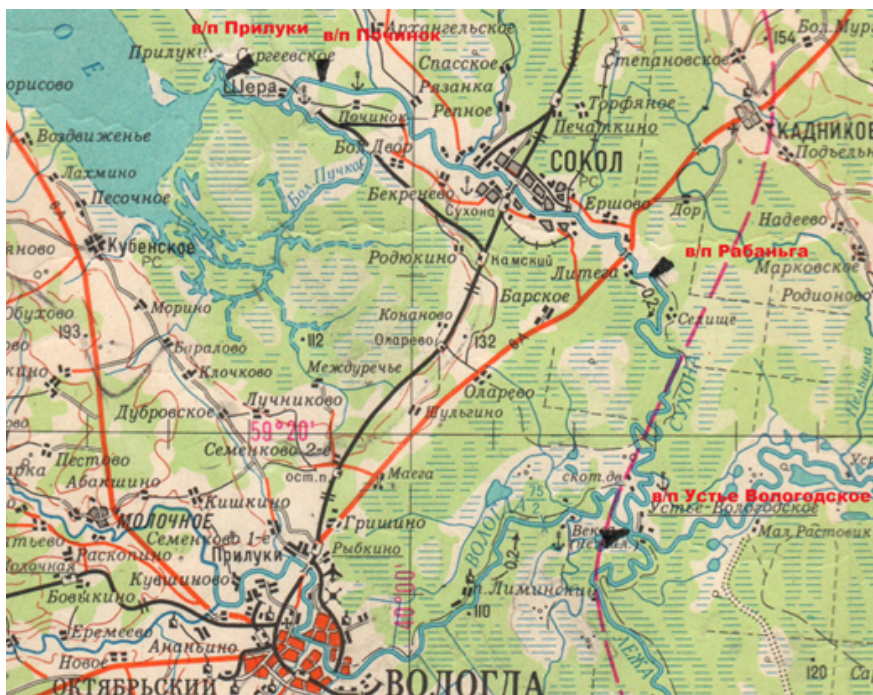


Рисунок 4. Карта-схема гидрологических постов на реке Сухоне, информация по которым была использована при анализе обратного течения⁴

Figure 4. Map of hydrological posts on the Sukhona River, information on which was used in the analysis of the reverse flow

Результаты исследования основных гидрологических характеристик обратного стока

Гидравлическую сущность формирования противотечения можно видеть на комплексном графике хода уровней весеннего половодья на опорных водомерных постах. На рисунке 5 показана динамика уровней воды и изменение во времени взаимного высотного положения уровней, изменяющихся в процессе обратного стока. На указанном рисунке показано соотношение отметок уровней воды, приведённых к Балтийской системе высот, измеренных на водомерных постах д. Починок, д. Рабаньга и д. Устье-Вологодское в период весеннего половодья 1983 года.

⁴ Географический атлас мира. М.: Ультра ЭКСТЕНТ фирма АРБАЛЕТ, 2008. 248 с.

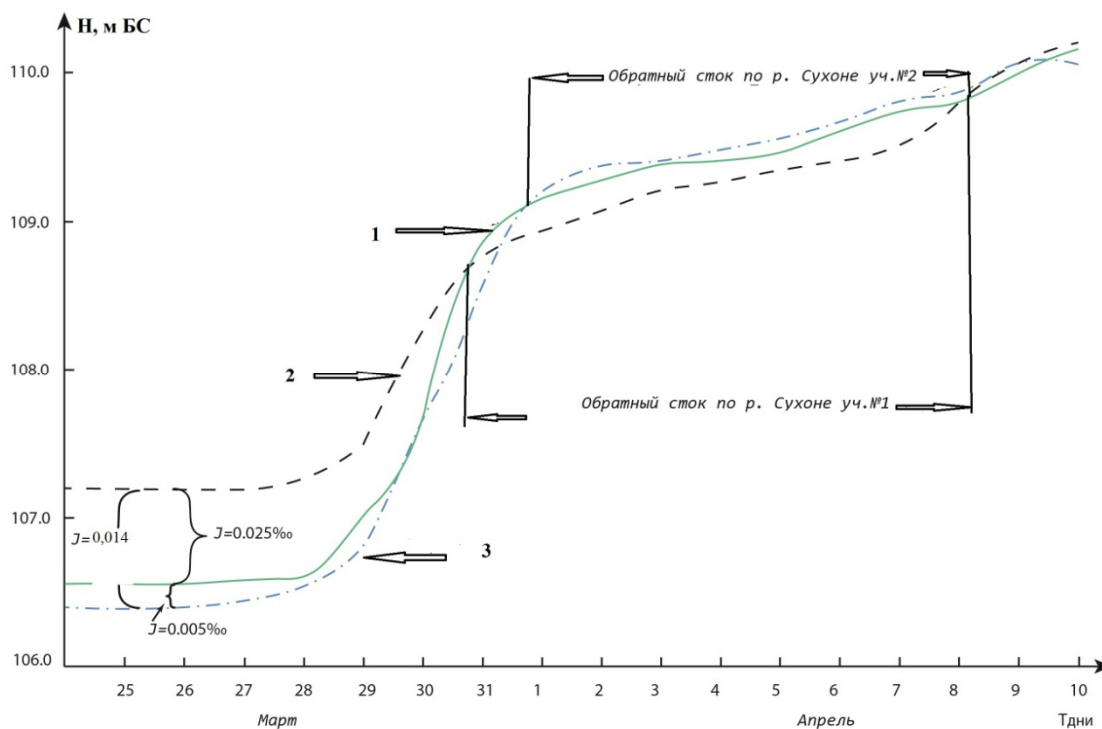


Рисунок 5. График хода уровней воды на р. Сухоне в период подъёма весеннего половодья 1983 года на водомерных постах: д. Рабаньга (1), д. Починок (2) и д. Устье-Вологодское (3)

Figure 5. Plot of water level curves on the Sukhona River during the spring flood raised in 1983 at Rabanga (1), Pochinok (2), and Ustye-Vologodskoye (3) water gauging stations

Результаты расчёта уклонов свободной поверхности руслового потока с использованием этих графиков показывают, что на исследуемых участках реки вначале наблюдаются положительные уклоны (в соответствии с каноническим направлением течения реки Сухоны). На выделяемых участках русла уклон составил (промилле): водомерный пост Починок – водомерный пост Рабаньга – 0,025; водомерный пост Починок – водомерный пост Устье-Вологодское – 0,014; водомерный пост Рабаньга – водомерный пост Устье-Вологодское – 0,005.

С развитием половодья на двух нижних створах (водомерные посты Рабаньга и Устье-Вологодское) скорость подъёма уровней опережает скорость подъёма в створе водомерного поста Починок, что приводит к возникновению гидравлического подпора с отрицательным уклоном, равным 0,009 промилле. Через двое суток отрицательный уклон водной поверхности сформировался и на участке водомерный пост Рабаньга – водомерный пост Починок и составил 0,002 промилле (рисунок 5).

На дату 8 апреля 1983 г. подпор, вследствие заполнения озера Кубенского тальми водами основного притока – реки Кубены и объёмами обратного стока, обратный сток остановился, и река Сухона пошла в обычном направлении.

На основе анализа всех материалов гидрометрических измерений института «Вологдагипроводхоз» за 1981-1986 гг. установлено, что обратное течение реки Сухоны всегда начинается на участке д. Починок – д. Рабаньга вероятнее всего от города Сокола, где река Сухона принимает левобережные притоки – реку Бохтюгу и реку Глушицу.

Данные краткосрочных наблюдений на гидрологических постах у д. Починок (1981-1985 гг.) и длительный ряд наблюдений у д. Рабаньга позволили дать оценку гидрологических характеристик обратного стока реки Сухоны в многолетнем разрезе.

Для этого данные наблюдений по водомерном посту Рабаньга были обработаны стандартными методами математической статистики⁵.

Кривые обеспеченности построены для следующих рядов: продолжительность обратного стока ($T_{от}$), средние расходы за период обратного стока ($Q_{от}$), объёмы обратного стока ($W_{от}$). Часть ординат этих кривых для квантилей заданной расчётной вероятности превышения представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Величины продолжительности обратного течения и суммарных объёмов воды за период обратного стока реки Сухоны в озеро Кубенское на основе расчётных вероятностей превышения

Table 1. The values of duration of the reverse flow and total water volumes for the period of the return flow of the Sukhona River to Lake Kubenskoye of the estimated probabilities of exceeding

Створ	Продолжительность обратного течения, $T_{от}$, сутки					Объёмы обратного течения, $W_{от}$, млн. м ³				
	1%	10%	25%	50%	$T_{сред.}$	1%	10%	25%	50%	$W_{сред.}$
Река Сухона – д. Рабаньга	18	13,7	11,0	8,3	8,0	132	96,0	70,0	49,0	53,5
Река Сухона – д. Починок	18	13,7	11,0	8,3	8,0	292	182	126,0	76,0	78,0

⁵ Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.

Таблица 2. Расчётные расходы воды и средние скорости течения реки Сухоны при обратном течении

Table 2. Estimated water flow rates and average flow rates of the Sukhona River in the reverse flow

Створ	Расходы воды, м ³ /с					Скорости течения, м/с				
	1%	10%	25%	50%	Q _{сред.}	1%	10%	25%	50%	V _{сред.}
Река Сухона – д. Рабаньга	146	108	87,0	66	68,8	0,21	0,16	0,14	0,11	0,11
Река Сухона – д. Починок	188	152	132	110	114	0,33	0,27	0,23	0,2	0,21

Выявление эмпирической корреляционной связи расходов обратного стока в створе водомерного поста Рабаньга с сопряжёнными с ними расходами воды в створе река Сухона – водомерный пост Починок, условно принимаемого нами за исток реки Сухоны, позволил оценить характеристики такой же обеспеченности в створе д. Починок (рисунок 6).

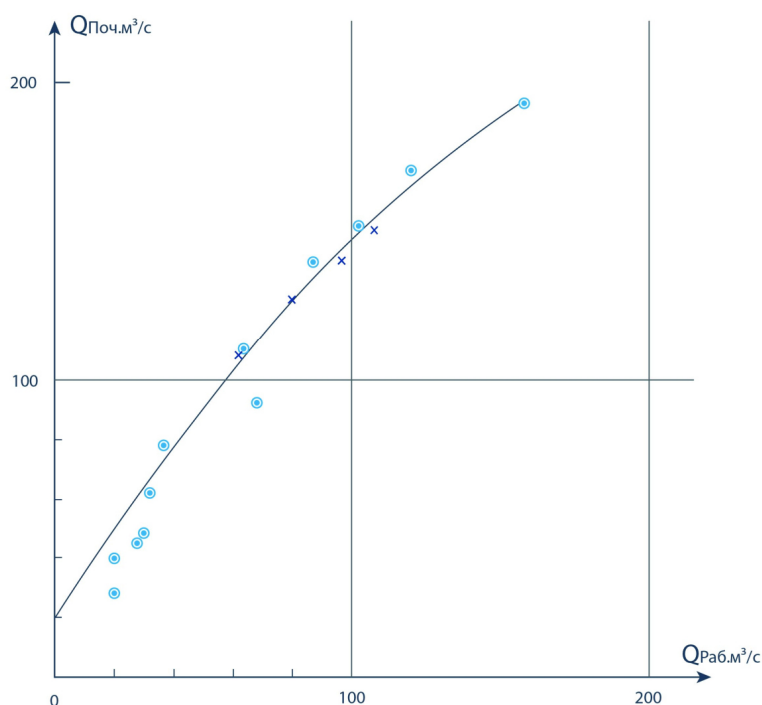


Рисунок 6. Эмпирическая зависимость расходов воды реки Сухоны по данным водомерного поста Починок от соответствующих расходов реки Сухоны на водомерном посту Рабаньга

Figure 6. The empirical dependence of the Sukhona River water discharge according to the Pochinok water metering station from the corresponding the Sukhona River water discharge at the Rabanga water metering station

Статистические характеристики продолжительности и объёмов обратного стока, полученные указанным способом для обоих учётных створов, представлены в таблице 1.

Установлено, что в среднемноголетнем разрезе обратный сток начинается 14 апреля, при наиболее ранней дате – 1 апреля (1968 г.) и поздней дате – 3 мая (1974 г.). Объёмы стока различной обеспеченности в сторону озера возрастают, что объясняется боковой приточностью и русловыми запасами самой реки. Средний многолетний боковой приток на участке д. Рабаньга – исток реки Сухоны в виде среднего расхода за время существования обратного течения равен $35,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Учитывая, что в оценённых выше объёмах стока значительную часть занимают недостаточно очищенные стоки городов Вологды и Сокола, можно предположить, что эти воды могут явиться фактором ухудшения качества озёрных вод в зоне влияния противотечения.

Поэтому вначале следует ответить на важный вопрос, успевают ли воды реки Вологды достигнуть озера прежде, чем река Сухона потечёт обычным образом?

Ответить на это возможно расчётами временных и гидравлических характеристик, обеспечивающих движение водных масс при обратном стоке. Одной из этих характеристик является время руслового добегания. Время руслового добегания (t_r), как известно, определяется по формуле

$$t_r = l/v \quad (1)$$

где l – длина расчётного участка реки, км;
 v – средняя скорость течения на расчётном участке.

Нивелирование водной поверхности в составе гидрометрических полевых изысканий, выполненных проектно-изыскательским институтом «Вологдаинжпроект», показали, что значения продольных уклонов свободной поверхности реки Сухоны в период обратного течения достигают 0,002-0,003 промилле, увеличиваясь по ходу в сторону озера Кубенского. Средние скорости по живому сечению потока также адекватно растут по длине реки в сторону озера (рисунок 7).

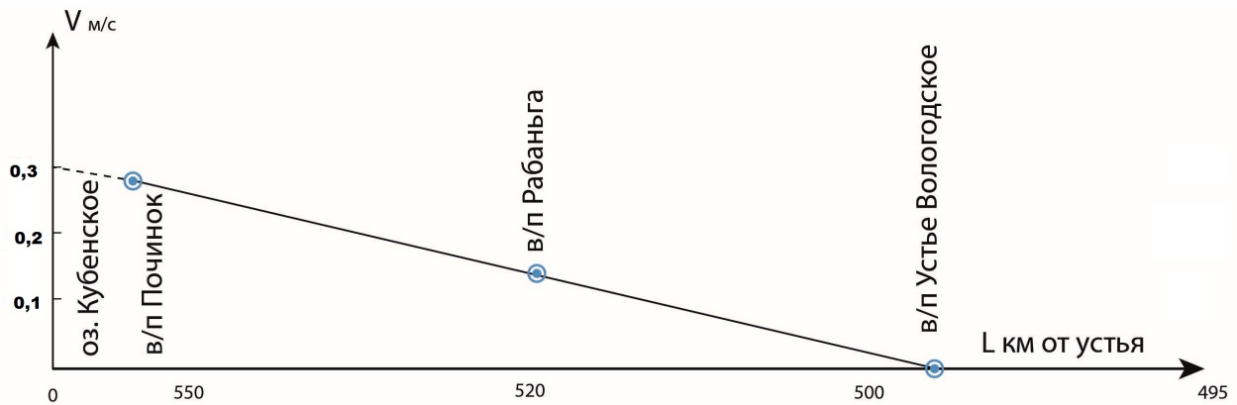


Рисунок 7. Изменение средней скорости течения по живому сечению потока при максимальных расходах обратного стока 10% вероятности превышения

Figure 7. The change in average flow of velocity over the living cross section of the flow at maximum flow rates of the return flow 10% probability of exceeding

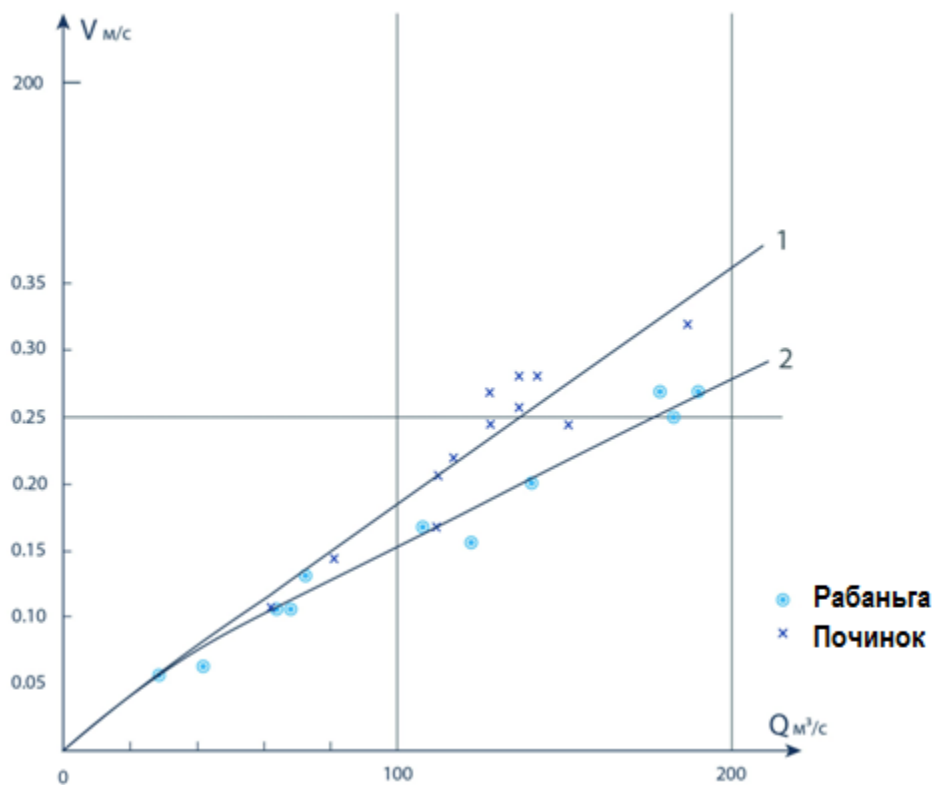


Рисунок 8. График зависимости средних по живому сечению скоростей обратного течения (V , м/с) от расходов обратного стока (Q , м³/с).

1 – водомерный пост Рабаньга, 2 – водомерный пост Починок

Figure 8. Graph of the dependence of the mean cross-sectional velocity of the reverse flow (V , m/s) on the flow rate of the return flow (Q , м³/с). 1 – water post Rabanga, 2 – water post Pochinok

Это хорошо просматривается на совмещённом графике зависимости скоростей от расходов воды, представленном на рисунке 8. Скорости течения в створе водомерного поста д. Починок, расположенного ближе к озеру, существенно больше скоростей на водомерном посту Рабаньга, если сравнивать их при одних и тех же расходах воды.

Среднее время руслового добегания реки Сухоны, рассчитанное по формуле (1), при скоростях, соответствующих расходам 10% обеспеченности, составило: на участке д. Устье-Вологодское – д. Рабаньга – 4,63 сут., на участке д. Рабаньга – д. Починок – 1,54 сут., на участке д. Починок – озеро Кубенское – 0,25 сут. Суммарное время составляет, таким образом, 6,42 сут.

Если общая продолжительность обратного стока 10% обеспеченности на участке Устье-Вологодское – д. Починок составила 13,7 сут. (таблица 1), то риск того, что часть загрязнённого талого стока с бассейна реки Вологды в этом случае достигнет акватории озера Кубенского вполне вероятен.

В этом случае возникает практический интерес к оценке дальности проникновения по акватории озера Кубенского вод реки Сухоны, предположительно несущих с собой стоки с селитебных и промышленных зон городов Вологды и Сокола.

Похожая задача решалась Институтом озероведения АН СССР в 1974 году для определения вероятной зоны распространения в озеро стока самого большого по водности притока озера – реки Кубены [Озеро Кубенское, 1977].

Расчётная математическая модель была представлена в следующем виде:

$$V_{ox} = V_o e^{-k\beta} \quad (2)$$

где $\beta = \frac{xH}{B_o H_o}$;

V_{ox} – средняя скорость течения в речной струе на расстоянии x от начального створа;

V_o, H_o, B_o – средние скорость, глубина и ширина в начальном створе, соответственно;

H – средняя глубина на участке растекания струи;

k – эмпирический коэффициент, интегрально учитывающий потери энергии в речной струе на трение о дно и боковые поверхности русла $k = 0,38 \beta^{-0,6}$.

При использовании этого подхода применительно к исследуемому процессу обратного стока реки Сухоны получено, что при расходах 10% вероятности превышения (рисунок 7, $V_o=0,29$ м/с) зона влияния обратного течения составляет около 2,5-3,0 км, при средних расходах 2,0 км.

Этого вполне достаточно для того, чтобы предположить, что исток подводящего канала для водозабора города Вологды из озера Кубенское (рисунок 3), с большой вероятностью окажется в зоне влияния вод обратного стока, транспортирующих загрязняющие вещества стоков городов Вологды и Сокола.

В этом смысле количественная оценка характеристик твёрдого «обратного» стока представляет, как упоминалось выше, практический интерес, поскольку значительная часть взвешенных наносов верховьев реки Сухоны пополняется упомянутыми сбросами сточных вод.

Далее рассмотрен транспорт влекомых и взвешенных русловых наносов, называемых в дальнейшем «твёрдым стоком».

Для решения этой задачи воспользуемся полученными выше вероятностными характеристиками объёмов «обратного жидкого стока» (таблица 1).

С использованием данных гидрологических измерений установлена эмпирическая зависимость объёмов твёрдого стока для створа река Сухона – д. Починок (рисунок 9).

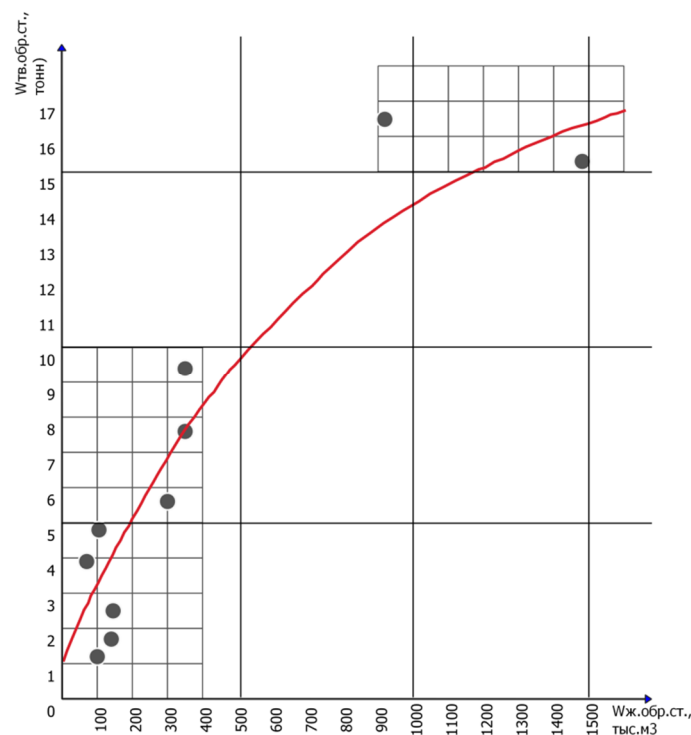


Рисунок 9. График связи объёмов твёрдого стока от расходов обратного стока на реке Сухоне в створе водомерного поста Починок

Figure 9. Plot of relationship between volumes of solid runoff and the costs of the return flow on the Sukhona River in the alignment of water post Pochinok

С привлечением среднесуточных значений расходов (таблица 2) и с помощью графика зависимости (рисунок 9) выполнены расчёты объёма твёрдого стока различной обеспеченности и соответствующие им величины средней мутности. Результаты этих оценочных расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики твёрдого стока в озеро Кубенское при обратном течении реки Сухоны

Table 3. Characteristics of solid runoff into Lake Kubenskoye in the reverse course of the Sukhona River

Створ	Объёмы взвешенных наносов, тыс. тонн				Средняя мутность, г/м ³			
	10%	25%	50%	норма	10%	25%	50%	норма
Река Сухона – д. Починок	1,62	1,45	1,18	1,44	8,87	12,2	15,6	18,5

Видно, что с увеличением объёма обратного течения возрастает и разбавляющая способность реки, опережая прирост объёма твёрдого стока, о чём свидетельствуют данные, представленные в таблице 3. Видно, что концентрация взвешенных наносов устойчиво снижается с увеличением объёмов жидкого и твёрдого стока.

В целом можно сделать вывод, что транспорт наносов в озеро Кубенское существенен и составляет в среднесуточном разрезе 1,4 тысяч тонн в год. Процессы аккумуляции этих наносов и характер их распространения в акватории юго-восточной части озера требует дополнительного изучения. Особое значение здесь имеет анализ химического состава этих наносов, и их воздействия на качество вод озера в маловодный период.

Результаты гидрохимических исследований реки Сухоны в период обратного стока

Учитывая большое хозяйственное значение озера Кубенского для областного центра города Вологда и Вологодской области в целом, остро встал вопрос о необходимости включения в комплексные исследования озера экологических и гидрохимических изысканий.

В этой связи собраны и обобщены материалы гидрохимических наблюдений СУГКС, результаты планового контроля комитета по экологии, областного и районных центров санэпиднадзора (ЦСЭН). Также были использованы результаты изысканий проектно-

изыскательского института «Вологдаинжпроект»⁶ и организации «ЭПИР» (Экология, проектно-изыскательские работы)⁷, выполненных ранее для оценки некоторых локальных процессов загрязнения вод в южной части озера и рек Прикубенской низины.

Для определения показателей качества вод озера Кубенского и реки Верхней Сухоны в период её обратного течения при участии автора были проведены необходимые гидрохимические измерения и обследования.

В период весеннего половодья 1994 г. произведён отбор проб и выполнен лабораторный гидрохимический анализ вод на участке реки Сухоны от города Сокола до начала подводящего канала водовода. Пробы воды на гидрохимический и санитарно-бактериологический анализы отобраны в ряде пунктов (рисунок 10).

Первые четыре пункта характеризуют изменение количественных показателей качества воды во время обратного течения на участке реки Сухоны от города Сокола до места водозабора для города Вологды. Пятая точка отбора характеризует район водозабора со стороны с. Кубенское и возможное изменение показателей качества вод озера Кубенского в случае формирования обратного течения в озеро по протоке Большой Пучкас.

Отборы проб воды были проведены в период с 6 по 20 апреля 1994 года. Обратное течение реки Сухоны в тот год началось 11 апреля и продолжалось 9 суток. Как показано выше, среднее расчётное время добегания водной массы на участке водомерный пост Устье-Вологодское – озеро Кубенское составляет более 6 суток, таким образом можно считать, что в данном случае обратный сток достигнет истока реки Сухоны, то есть акватории озера Кубенского.

Гидравлические характеристики обратного стока, зафиксированные автором во время полевого обследования 18.04.1994 г. в створе шлюза Знаменитый: $V_{пов}=0,5$ м/с, уровень воды в верхнем бьефе 108,7 м БС, $Q = 89,8$ м³/с, близки к средним.

Рекогносцировочное обследование протоки Большой Пучкас показало, что течение по ней не наблюдалось в сторону реки Сухоны даже в период наиболее интенсивного обратного течения последней 18-20.04.1994 г.

⁶ Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 167 с.

⁷ Определение возможности поступления стоков животноводческого комплекса «Дубровское» в водовод Кубенское-Вологда через грунтовые воды: отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый Вологда: МП «ЭПИР», 1991. 50 с.



Рисунок 10. Схема расположения пунктов отбора проб на гидрохимический анализ воды реки Сухоны во время весеннего половодья 1994 г.⁸:

1. Река Сухона – д. Когаш (водозабор города Сокола);
2. Река Сухона – п. Шера (в створе шлюза Знаменитый);
3. Река Сухона – д. Прилуки (входной створ в озеро);
4. Озеро Кубенское – начало подводящего канала (0,5км от берега);
5. Исток протоки Большой Пучкас в створе насосной станции водозабора

Figure 10. The map of the sampling points for hydrochemical analysis of the Sukhona River during the 1994 spring flood: 1. R. Sukhona – village Kogash (water intake of the city Sokol);

2. R. Sukhona – p. Shera (in the site of the gateway Znamenity);
3. R. Sukhona – village Priluki (entrance target to the lake);
4. Oz. Kubenskoye – the beginning of the supply channel (0.5 km from the coast);
5. Source of the river Bolshoy Puchkas at the site of the pumping station of the water intake)

⁸ Географический атлас мира. М.: Ультра ЭКСТЕНТ фирма АРБАЛЕТ, 2008. 248 с.

С целью анализа динамики гидрохимической ситуации по учётным створам реки Сухоны и озера Кубенского необходимые гидрохимические показатели определялись в период отдельных фаз весеннего половодья:

- а) до начала обратного течения;
- б) во время обратного течения;
- в) по окончании обратного течения.

Установлено, что до начала обратного течения показатели качества стока из озера Кубенского практически по всем ингредиентам не выходят за пределы ПДК⁹.

Ниже города Сокола (д. Кузнецово) концентрации загрязняющих веществ несколько возрастают, что можно связать с талым стоком с территории города. Некоторые данные представлены в таблице 4.

Таблица 4. Изменение показателей качеств воды реки Сухоны в период талого стока с территории города Сокола

Table 4. Change in water quality indicators of the Sukhona River during melt runoff from territory of the city Sokol

Показатели	Значения показателей на 6.04.1994	
	Выше города Сокола	Ниже города Сокола
Биохимическое потребление кислорода (БПК _{полн}), мг·О ₂ /л	3,6	6,8
Взвешенные вещества, мг/л	0,4	1,4
Коли-индекс, экз./100мл	2400	24000
Хлориды, мг/л	7,5	12,5
Общая минерализация, мг/л	319,2	342,8
рН	7,5	7,6
Нитраты мг/л	2,6	2,9
Сульфаты мг/л	40	40

После начала обратного течения, Сокольской лабораторией ЦСЭН были отобраны повторные пробы воды в этих же пунктах. Данные лабораторных анализов проб воды, взятых

⁹ Влияние деятельности ТОО «Фетинино» на качество водных ресурсов озера Кубенского: Отчёт о НИР / Отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1993. 78 с.

18.04.1994, свидетельствуют об ухудшении качества воды реки Сухоны в сторону озера Кубенского.

У д. Кузнецово (выше города при обратном течении) взвешенные вещества превысили ПДК в 10 раз, нитриты – в 1,2 раза, концентрация свинца уменьшилась и составила 0,11 мг/л, а в створе водозабора (ниже города при обратном течении) концентрация свинца возросла до 0,9 мг/л (1,2 ПДК). Появляются фенолы в концентрации 2,1 ПДК.

Аналогичные либо близкие результаты аналитического контроля получены лабораторией муниципального предприятия «Горводоканал» города Вологды для створа реки Сухона – д. Когаш 18.04.1994. По их данным получено: взвешенные вещества – превышение около двух ПДК, свинец не обнаружен, но зафиксированы нефтепродукты в количестве 4,0 ПДК.

Естественно различия цифровых показателей качества воды связаны с очевидной дискретностью наблюдений на фоне высокой турбулентности руслового потока.

Тем не менее можно говорить об устойчивой тенденции загрязнения талых вод реки Сухоны именно в результате поворота её потока вспять. Результаты анализа данных по гидрохимии за 1991-1993 гг. свидетельствуют в пользу этого предположения (таблица 5).

Таблица 5. Показатели качества воды (в долях ПДК) реки Сухоны в створе д. Когаш при прямом течении (числитель) и при обратном течении (знаменатель)¹⁰

Table 5. Water quality indicators (in fractions of MPC) of the Sukhona River in the alignment of the village Kogash with a direct flow (numerator) and with a reverse flow (denominator)

Показатели	Доли ПДК		
	1991 г.	1992 г.	1993 г.
Взвешенные вещества	$\frac{0,0}{1,4}$	$\frac{0,0}{1,45}$	$\frac{0,35}{3,1}$
Биохимическое потребление кислорода (БПК _{полн})	$\frac{1,13}{0,5}$	$\frac{0,26}{1,28}$	$\frac{0,9}{1,12}$
Азот аммонийный	$\frac{0,0}{1,24}$	$\frac{0,0}{1,06}$	$\frac{0,0}{0,8}$
Лактозоположительные кишечные палочки (ЛКП)	$\frac{1,5}{1,4}$	$\frac{1,1}{1,4}$	$\frac{0,0}{0,0}$

Следует отметить, что перемещение наносов по руслу реки Сухоны происходит во взвешенном состоянии, сальтацией и влечением по дну. При этом, как правило, на дне

¹⁰ Мероприятия по сохранению и восстановлению качества водных ресурсов бассейна Кубенского озера: Отчёт о НИР / отв. исп. А.В. Белый. Вологда: Вологдаинжпроект, 1994. 176 с.

образуются различные русловые формы – рифели, гряды. Размеры таких форм изменяются от нескольких сантиметров до нескольких метров. По поверхности гряд чаще всего передвигаются формы длиной от 1-2 м до самых мелких рифелей, длина которых не превышает 10-20 см. В общем русловые формы принято делить на макро-, мезо- и микроформы [Дедков, Мозжерин, 1984].

Формирование русловых форм определяется основными гидравлическими характеристиками потока – скоростью, направлением течения, интенсивностью пульсации. При установившемся режиме потока на дне реки образуется набор русловых форм из материала донных отложений.

При достаточно быстрой смене направления течения реки на противоположное, как это имеет место на реке Сухоне, возможно начало достаточно интенсивной перестройки русловых мезо- и микроформ. Этот процесс дополнительно вовлекает в твёрдый сток значительное количество взвешенных наносов, которые благодаря относительно небольшому расстоянию до озера вполне его достигают.

Изменение концентрации взвешенных наносов по длине реки в сторону озера, подтверждает это предположение. Величины концентраций изменяются от 7,7 до 19,5 мг/л на участке от города Сокола до водозабора для города Вологды. Учитывая высокую адсорбционную способность взвешенных частиц, можно говорить и об увеличении переноса соединений тяжёлых металлов в озеро, до этого консолидированных в толще донных отложений. Предположительно мы имеем дело с фактом вторичного загрязнения вод Верхней Сухоны ингредиентами, вымываемыми из донных отложений при обратном течении.

В качестве подтверждения этого предположения можно привести резкое возрастание концентрации марганца при обратном стоке – с 0,078 до 0,8 мг/л. Здесь, конечно, можно говорить о совпадении двух процессов – вовлечения в русловый поток взвесей, адсорбировавших марганец, и усиление окислительно-восстановительного процесса, определяемого высоким содержанием растворенного кислорода в талых водах.

К природным источникам марганца, кроме упомянутых, можно отнести прилегающие заболоченные пойменные территории, характерные кислой реакцией среды, где интенсивно протекают процессы микробиологического восстановления марганца до двухвалентного, в результате чего подвижность марганца повышается, особенно в виде органоминеральных комплексов.

Обращает на себя факт обнаружения в воде довольно редкого металла – молибдена. В пункте д. Когаш его концентрация составила 0,008 мг/л (6,7 ПДК), в начале подводящего

канала – 0,035 мг/л (29,2 ПДК). Факты обнаружения молибдена в воде, поступающей на очистные сооружения системы водоснабжения города Вологды, отмечаются в плановых пробах лаборатории муниципального предприятия «Горводоканал» в концентрациях 0,005-0,008 мг/л. Поскольку по значению кларка в земной коре молибден находится от конца на седьмом месте после золота, трудно предположить природное происхождение этого микроэлемента.

По всему транзитному участку реки Сухоны прослеживаются нефтепродукты в концентрации около 4,0 ПДК, за исключением точки отбора у начала подводящего канала. По мере приближения к озеру снижается концентрация синтетических поверхностно-активных веществ с 0,34 мг/л у города Сокола до 0,09 мг/л у истока подводящего канала. Отмечается некоторое повышение аммония солевого – NH_4^+ до 1,5 ПДК, БПК_{полн.} изменяется от 3,8 до 5,4 мг·О₂/л.

Санитарно-бактериологическое исследование проб воды реки Сухоны и озера Кубенского 18-20.04.1994 свидетельствует о допустимом либо умеренном загрязнении. Так показатель ЛКП (лактозоположительные *кишечные палочки*) изменяется от 4600 до 23000 ед./мл, ОМЧ (общемикробное число) от 50 до 300 ед./мл, хотя до города Сокола (д. Кузнецово) ситуация несколько хуже: ЛКП – 240000 ед./мл, коли-индекс 240000 ед./л. Большинство показателей качества воды относительно рыбохозяйственного лимитирующего показателя вредности находятся в пределах изменений фоновых значений.

Качество воды в истоке протоки Большой Пучкас в створе насосной станции по большинству показателей не выходит за пределы требований ГОСТа «Вода питьевая». Визуальное наблюдение за ареалом распространения обратного стока показало, что воды реки Сухоны не достигают этого пункта и не влияют на изменение качественных показателей воды.

Анализ проб воды реки Сухоны по окончании обратного течения, выполненный лабораторией Сокольского ЦСЭН 31.05.1994, в створе водозабора и ниже города Сокола у д. Кузнецово показывает, что качество вод реки Сухоны (в сущности это уже озёрные воды!) выше города Сокола по большинству показателей не выходит за пределы допустимых значений. Отмечается некоторое превышение по нефтепродуктам – 0,16 мг/л и свинцу – 0,04 мг/л. Река Сухона в пределах черты города Сокола испытывает нагрузку от сточных вод, поэтому отмечается увеличение концентрации нефтепродуктов до 0,32 мг/л, свинца – до 0,07 мг/л.

Выводы и рекомендации

1. Выполнен количественный анализ причин и следствий обратного течения в верховьях реки Сухоны во время весеннего половодья и вычислены многолетние гидрологические характеристики этого явления.

2. Оценена дальность проникновения вод реки Сухоны в озеро Кубенское, что даёт возможность оценить их влияние на качество водных ресурсов озера и воды, поступающей в район водозабора города Вологды. При обратном течении реки Сухоны во время весеннего половодья водные массы достигают начала подводящего канала водозабора, расположенного в 2 км от истока реки.

3. Факт движения вод реки Сухоны по протоке Большой Пучкас в сторону водозабора не установлен. Рекогносцировочное обследование в весенний период, опрос жителей свидетельствует о постоянном направлении стока Большого Пучкаса в реку Сухону.

4. Выполнена оценка характеристик твёрдого стока, поступающего в озеро во время обратного течения реки Сухоны.

5. Воды, проникающие в озеро со стороны реки Сухоны и достигающие места водозабора, характеризуются как загрязнённые и по своим гидрохимическим показателям не отвечают требованиям к озеру Кубенскому как водоёму высшей рыбохозяйственной категории.

6. По окончании обратного течения реки Сухоны показатели качества вод озера Кубенского возвращаются к исходным.

7. Для избежание попадания загрязнённых вод в водозабор города Вологды рекомендуется разработать соответствующий регламент работы водозаборных сооружений.

Литература

References

- Дедков А.П., Мозжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. 263 с.
- Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle [Erosion and sediment runoff on Earth]*. Kazan': Publ. of Kazan University, 1984. 263 p. (In Russian).
- Ильина Л.Л., Грахов А.Н. Реки Севера. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 128 с.
- Il'ina L.L. Grakhov A.N. *Reki Severa [The rivers of the North]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1987. 128 p. (In Russian).

- Ильинский Н.В.* Вологодский край: Пособие с методическими послесловиями для школьных работников, учащихся старших групп педтехникума и девятилетки, а также для краеведов Ч. 1. Естественно-производительные силы. Вологда: Вологодск. губ. отд. нар. образ., 1928. 166 с.
- Ильинский Н.В.* *Vologodskii krai: Posobie s metodicheskimi poslesloviyami dlya shkol'nykh rabotnikov, uchashchikhsya starshikh grupp pedtekhnikuma i devyatiletki, a takzhe dlya kraevedov Chast' 1. Estestvenno-proizvoditel'nye sily [Vologda Territory: a manual. Part 1. Natural-productive forces].* Vologda: Publ. of Vologda provincial department of public education, 1928. 166 p. (In Russian).
- Кириллова В.А.* Характеристика притоков озера // Кубенское озеро: Материалы комплексных исследований / Отв. ред. Т.И. Малинина и И.М. Распопов. Л.: Наука, 1974. С. 9-11.
- Kirillova V.A.* *Kharakteristika pritokov ozera.* In T.I. Malinina and I.M. Raspopov (eds.) *Kubenskoe ozero: Materialy kompleksnykh issledovaniy [Kubenskoye Lake: Materials of integrated research]* Leningrad, Publ. Nauka, 1974, pp. 9-11. (In Russian).
- Озеро Кубенское: в 3 ч. Ч. 1. Гидрология* / Отв. ред. Т.И. Малинина и И.М. Распопов. Л.: Наука, 1977. 306 с.
- Ozero Kubenskoe: v 3 ch. Ch. 1. Gidrologiya [Lake Kubenskoe: in 3 parts. Part 1. Hydrology]* Editors T.I. Malinina and I.M. Raspopov. Leningrad, Publ. Nauka, 1977. 306 p. (In Russian).
- Ресурсы поверхностных вод: в 6 т. Т. 3. Северный край* / Под ред. И.М. Жила и Н.М. Алюшинской. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 663 с.
- Resursy poverkhnostnykh vod: v 6 t. T. 3. Severnyi krai [Surface water resources: in 6 volumes. Vol. 3. The Northern Territory].* Editors I.M. Zhila and N.M. Alyushinskoi. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1972. 663 p. (In Russian).
- Филенко Р.А.* Воды Вологодской области. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1966. 132 с.
- Filenko R.A.* *Vody Vologodskoi oblasti [Waters of the Vologda region].* Leningrad: Publ. of the Leningrad University, 1966. 132 p. (In Russian).