

В. А. Знаменский

## Модель антропогенной нагрузки на реку и формирования качества воды в реке

Аннотация. Содержит описание теоретического принципа построения модели. Модель основана на теории объединения потоков вещества при объединении струй в водотоке. В качестве примера представлена реальная модель антропогенного воздействия на реку Кача, левый приток р. Енисей. Показано использование модели для оценки величины нагрузки на реку потоками веществ, сброшенных со сточными водами, и дано сравнение показателей с результатами натуральных измерений. Оценена чувствительность модели к изменению нагрузки.

*Ключевые слова и фразы:* струя водотока, поток вещества, водохозяйственный баланс, потоковый баланс, плотность потока, антропогенная доля.

### Введение

В речном бассейне заключена сложная система водотоков, при которой каждый водоток динамично изменяется во времени [1], изменяется в пространстве в пределах поймы реки [2] и в качественных характеристиках воды [3]. Каждый момент времени вода в любом месте реки другая. Нестабильность в пространстве и динамичность системы водотоков усложняют отражение в модели временного изменения свойств речной системы.

Ограничим понятие антропогенной нагрузки комплексом воздействий на речную воду, приводящим к изменению расхода воды и качества её в реке.

Цель моделирования обычно состояла в имитации распределения качества воды в реке на основе смешения концентрации вещества в сточных водах с концентрацией того же вещества в речных водах.

---

Работа поддержана: «Нормативы предельно допустимых вредных воздействий (ПДВВ) на водный объект: р.Кача в Емельяновском районе и г.Красноярске Красноярского края» (2004 г.); «Разработка норм предельно-допустимых концентраций веществ в 10 реках бассейна р.Енисей» (2007 г.) «Схема комплексного использования и охраны водных ресурсов р. Енисей» (Часть 1, 2009 г.)

Принцип смешения концентраций вещества был еще в 1933 г. математически выражен В.М. Маккавеевым [4] в дифференциальном уравнении турбулентной диффузии. Маккавеев приравнял изменение концентрации вещества во времени к ускорению изменения её в пространстве с поправкой на коэффициент турбулентности. В уравнении в сущности три переменных: концентрация, время и расстояние.

Караушев А.В. [5] решил уравнение В.М. Маккавеева в частных производных. Численное (детальное) решение задачи распространения концентрации вещества по акватории наиболее образно выражало идеологию смешения. Трудоёмкость вычисления надолго задержала его распространение.

При моделировании изменения концентрации вещества в реке в процессе расчётов допустимой концентрации вещества в сточных водах в основном применялся аналитический метод Фролова-Родзиллера (ВОДГЕО) [6], по которому диффузия сточных вод сопровождается разрушением струи окружающим водотоком в процессе смешения и завершается равномерным добавлением к речной воде превышения концентрации вещества в сточных водах над концентрацией его в реке (формула (1)).

$$(1) \quad C_{max} = C_e + \frac{C_{ст} - C_e}{n},$$

где  $C_e$  — концентрация вещества в реке;  $C_{ст}$  — то же в сточных водах;  $n$  — кратность разбавления, которая определяет расход речной воды, участвующей в смешении. Это формула выразила разделение максимальной концентрации  $C_{max}$  на фоновую концентрацию  $C_e$  и приросту к ней.

Усилия разработчиков были направлены на поиск упрощённого способа уточнения прироста к фоновой концентрации вещества в реке. Для вычисления прироста предлагалось [7] использовать безразмерный показатель разбавления  $N$  (Государственный гидрологический институт), затем, пришлось дополнить его относительной глубиной  $\tilde{H}$  (Бесценная М.А.). Предлагали применять кривую нормального распределения концентрации вещества в акватории (Таллинский политехнический институт и УралНИИВХ). Результаты применения каждого «упрощённого» метода настолько неопределённо различались, что не нашлось правила для выбора наиболее точного результата.

Дружинин Н.И. и Шишкин А.И. [8] рассмотрели аналитические и численные методы решения задачи распределения концентрации

вещества в речной воде в зависимости от скорости течения, уделив особое внимание методу электрогидродинамических аналогий, реализованному на аналоговых вычислительных машинах.

Белолипецкий В.М. и Шохин Ю.И. [9] предложили дифференциальное уравнение, в котором «поток, переносимый течением,» выражается дивергенцией произведения «интенсивности загрязняющей субстанции, мигрирующей вместе с потоком воды» на вектор скорости. Здесь те же аргументы: время, концентрация вещества и скорость перемещения.

Другие разработчики моделей отказались от применения разбавления вообще. В работе [10] построение профиля концентрации вещества по течению воды основано на статистических связях концентрации вещества с расходом воды в створе реки. Для точного определения связей необходимо было фиксировать расход речной воды в момент отбора пробы воды на анализ, чего не соблюдалось в в общегосударственной системе наблюдения и контроля (ОГСНК).

Определение антропогенной нагрузки на водоток рассматривается в Методических указаниях по расчету нормативов допустимого воздействия на водные объекты (НДВ) [11]. Предлагается оперировать с массой вещества, накопленной в бассейне за период от месяца до года. Методика не согласуется с естественным процессом, при котором расходы воды и массы веществ не накапливаются в реке.

Изучение струйных процессов в реке [12] показало, что принцип изменения концентрации вещества при перемещении (принцип диффузии сточных вод в реку за счёт вибрации скоростей течения) не точно отражает природный процесс. В реке струя внедрения (сточных вод, притока, береговой фильтрации) не разрушается, не смешивается с речной водой. Она существует на большой длине пути в реке за счёт собственной энергии и содержит поток вещества ( $\Pi$ ), который выражается произведением расхода воды  $Q$  на концентрацию вещества  $C$ , содержащегося в струе:

$$\Pi = Q \cdot C.$$

Струя постепенно размывается по поверхности примыкания к соседней струе водотока. В ней уменьшаются расходы воды и потоки веществ, но плотности потоков охраняются в остатке струи на уровне сточных вод. Модель такого процесса — это модель антропогенной нагрузки на речную систему при движении воды к устью реки. В ней переменной величиной является поток вещества, измеряемый в



Рис. 1. Струи рек Курнаевка (1) и Рыбная (2) и пакет струй притока, впадающего выше по течению (3)

$g/c$  или в  $g/ч$ . Плотность потока (концентрация) вещества – это постоянная величина характеризующая только одно свойство потока в момент времени моделирования.

## 1. Основные положения

В представляемой потоковой модели рассчитывается нагрузка водотока потоками каждого вещества. Для такой модели имеется лишь одно соответствие: вторая задача автоматизированной системы контроля водоохранных мероприятий (АСКВод «Енисей») [13], программа которой написана на КОБОЛе. Она была в эксплуатации на вычислительной машине М4030 с 1979 г. по 1982 г., и на ЕС1610 - с 1982 г. по 1989 г., до распространения компьютеров. Главная переменная величина в ней – водоёмкость, или, после умножения на ПДК, – поток вещества. Таблицы и графики математической модели составляют статический образ момента существования системы водотоков. Модель подобна мгновенной фотографии составного объекта, в котором каждая часть его перемещается по своей траектории, оригинально изменяя собственные свойства.

На рис. 1 приведена фотография участка реки Ангара, взятая из Google, на которой зафиксированы образы трёх струй в водотоке. У берега расположилась струя реки Курнаевка. К ней прижимается струя реки Рыбная, а рядом располагается пакет струй притока, впадающего выше по течению. Струи не рассеиваются в реке Ангара, не смешиваются с водотоком. Каждая струя обособлена в турбулентно диффузном ограждении и имеет неизменный состав. В ней концентрация вещества распределена равномерно. Интервал в котором существуют струя, обладающая некоторой турбулентностью, поддерживается вибрацией скоростей течения на стыке струй.

Скорость течения воды в струе падает за счёт путевых потерь энергии. При падении ниже предела интервала вибрации скоростей поверхность турбулентно диффузного ограждения резко сокращается. Часть расхода воды высвобождается и диффундирует в соседнюю струю. Остаток струи продолжает двигаться у берега или рядом с прибрежной струёй в новом интервале вибрации скоростей, по-прежнему сохраняя свойства воды притока. Струя существует за счёт собственной энергии.

Объединение водотоков происходит в объёме расходов воды в струях - участниках объединения. Поэтому расход воды  $Q_i$  в створе реки  $i$  состоит из суммы расходов, имеющихсся во всех струях, как это и показано на рис. 1.

$$Q_i = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \dots + Q_m.$$

Можно записать, также:

$$(2) \quad Q_i = \alpha_0 Q_i + \alpha_1 Q_i + \alpha_2 Q_i + \dots + \alpha_m Q_i,$$

$Q_i$  — расход воды в створе  $i$  реки,  $m^3/c$ ;  $\alpha_m$  — доля расхода струи в общем водотоке;  $m$  — номер внедрения в водоток,  $m = i - 1$ .

В струйной (энергетической) теории объединения водотоков [12] рассматривается условная расчётная струя, равная расходу воды в устье притока. Она вмещает остаток внедрившейся струи притока и является экстремальной по качеству воды в любом створе водотока. Расход воды в расчётной струе рассматривается как сумма остатка расхода воды притока и дополнения к нему от реки или, как для струи №1 (рис. 1), дополнение воды поступает от струи №2.

$$(3) \quad Q_c = \mu_z Q^{CT} + (1 - \mu_z) Q_c^p,$$

где  $Q_c$  — расход струи,  $m^3/c$ ;  $Q^{CT}$  — расход струи сточных вод,  $m^3/c$ ;  $Q_c^p$  — расход воды, равный расходу струи, так что  $Q_c = Q^{CT} = Q_c^p$ ;  $\mu_z$  — доля остатка струи, внедрённой в водоток. Для расчёта доли остатка  $\mu_z$  применяется формула:

$$(4) \quad \mu_z = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{2}k}},$$

где  $k$  — количество шагов процесса, равное:

$$k = \frac{L_{i+1}}{\Delta X}$$

. где  $\Delta X$  — шаг процесса, м;  $L_{i+1}$  — расстояние до следующего расчётного створа, м.

Первый член правой части, баланса (3) выражает остаток струи, второй член — дополнение остатка до исходной расхода струи. Всегда требуется соблюдать неравенство  $\mu_z \geq \alpha$ .

В каждой струе реки при её движении перемещаются массы многих веществ. Перемещается поток каждого вещества через сечение струи со скоростью  $z/c$ . Поток вещества обладает свойством плотности. Средняя плотность потока вещества в реке характеризует все струи водотока. Это отличает его от средней из измеренных концентраций в створе реки, так как такая средняя учитывает только случайные струи, из которых отобраны пробы воды. Остальные струи игнорированы.

При объединении водотоков происходит объединение потоков вещества, которые перемещаются в струях. Установлено, что потоки веществ объединяются пропорционально долям расхода воды в струе водотока. Для суммарного потока вещества  $j$  в створе  $x$  формула (2) запишется так:

$$(5) \quad \Pi_{x,j} = \alpha_{0,j}\Pi_{x,j} + \alpha_{1,j}\Pi_{x,j} + \alpha_{2,j}\Pi_{x,j} + \dots + \alpha_{m,j}\Pi_{x,j},$$

где  $\Pi_{x,j}$  — суммарный поток вещества  $j$  во всех струях створа  $x$ ;  $\alpha_{0,j}$  — доля потока струи (пакета струй) в суммарном потоке. На основе этой формулы выстраивается строка потокового баланса вещества в сечении водотока.

Метод А.В. Караушева — это единственный из известных методов, который, вопреки мнению его создателя, отражает струйный процесс в водотоке. Но численное решение требует затрат времени. Для устранения этой помехи разработано аналитическое продолжение детального метода А.В. Караушева, позволяющее обходиться без построения поля.

В основу аналитического продолжения метода Караушева положен энергетический (струйный) метод, разработанный автором. Продолжение детального метода отличается от струйного метода только расчётом величины  $\Delta X$  на основе коэффициента турбулентной диффузии. Детальный метод турбулентной диффузии точно соответствует энергетическому (струйному) методу только тогда, когда величина шага расчёта ( $\Delta X$ ) равна величине шага, определённого для энергетического метода, а струя поступает в реку по нормали к течению. Ради определения коэффициента турбулентной диффузии в модели предусмотрено выполнение гидравлического расчёта сечения реки.

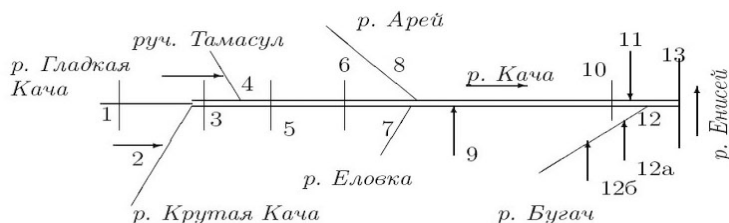


Рис. 2. Схема реки Кача

ТАБЛИЦА 1. Створы на реке реки Кача

Створ	Дополнительные сведения
1. Р. Гладкая Кача	Исток реки Качи
2. Р. Крутая Кача	Приток, в который сброшены сточные воды после полной биологической очистки
3. п. Памяти 13	Створ, на котором осуществлялся гидрохимический контроль в ОГСНК
4. Руч. Тамасул.	Приток, в который сброшены сточные воды после полной биологической очистки
5. Ниже Тамасул	Створ, расположенный в 3-х км ниже устья руч. Тамасул
6. Выше Емельяново,	Гидрометрический створ ОГСНК
7. Р Еловка	Приток с эпизодически измеренными расходом воды и гидрохимией
8. Р. Малый Арей	Приток с эпизодически измеренными расходом воды и гидрохимией
9. С. Емельяново	Сброс сточных вод после полной биологической очистки
10. Выше п. Солонцы.	Эпизодические замеры расходов
11. Пос. Солонцы	Выпуск неочищенных сточных вод
12. Р. Бугач	Приток с двумя выпусками сточных вод. Разовые расход воды и гидрохимия
13. Устье р. Качи	Створ, на котором осуществлялся гидрометрия и гидрохимия в ОГСНК

В качестве иллюстрации приводится краткое описание модели для реки Кача. Скелетная схема дана на рис. 2. Описание к схеме приведено в таблице 1.

## 2. Модель антропогенной нагрузки на реку Качу

Река Кача — предгорная река. Она расположена на территории Емельяновского района Красноярского края и части территории г. Красноярска. Граница г. Красноярска проходит между створами №11 и №12 (Рисунок 2).

Выбор реки обусловлен её небольшой длиной (108 км), небольшим количеством мест антропогенного воздействия и наличием многолетних наблюдений. На реке велись гидрохимические наблюдения с 1971 г., а гидрометрические — с 1972 г.

Контрольные створы, расположенные в 500 м ниже выпусков не выделяются отдельными строками. По рельефным условиям (прижим водотока к скалам) ниже створа №4 отбор проб воды на расчётном удалении оказался не возможен. Ближайший доступный створ оказался в 3 км от устья ручья (створ №5). Он вынужденно включён в баланс отдельной строкой.

### 2.1. Водохозяйственный баланс

Объединенный водоток состоит из долей, выражающих истоковый и присоединенные расходы воды за вычетом расходов изъятия. Расходы воды, имеющие одинаковое происхождение, могут суммироваться по их долям. Рассортируем струи по происхождению, обозначив доли расхода:

- истока —  $\alpha_i^{(0)}$ ;
- притока —  $\alpha_i^{(2p)}$ , где  $i=1 \dots a$ ;
- боковой приточности —  $\alpha_i^{(2x)}$ , где  $i=a+1 \dots b$ ;
- сточных вод —  $\alpha_i^{(2)}$ , где  $i=b+1 \dots c$ ;
- изъятия —  $\alpha_i^{(-2)}$ , где  $i=c+1 \dots k$ .

Уравнение таких расходов в базовом створе:

$$(6) \quad Q_k = \alpha_i^{(0)} Q_k + \sum_i^a \alpha_i^{(2p)} Q_k + \sum_{i=a+1}^b \alpha_i^{(2x)} Q_k + \sum_{i=b+1}^c \alpha_i^{(2)} Q_k - \sum_{i=c+1}^k \alpha_i^{(-2)} Q_k.$$

Это уравнение позволяет заполнить строку таблицы сгруппированными данными по одному створу. Набор строк в соответствии с перечнем створов составляет таблицу водохозяйственных характеристик створов. При перемещении воды от створа к створу в реке будет



возрастать расход каждой группы воды. Для отражения этого процесса в таблицу для каждой группы добавляются колонки, в которых накапливаются расходы воды. Окончательно таблица содержит девять числовых колонок, которые являются статьями баланса.

Статьи баланса, кроме девятой, представлены парами колонок. Колонки нечётных номеров содержат информацию о расходах воды, добавленных (изъятых) на участке между створами и в створе, и сгруппированных по их происхождению:

- первая — расходы воды в истоке и по притокам, по которым они известны;
- третья — попутной приточности воды, включающей притоки с неизвестными расходами воды;
- пятая — максимальный в течении суток секундный (часовой) расход, сбрасываемой водопотребителем в виде сточных вод или вод, переброшенных из бассейна другой реки;
- седьмая — расход, отбираемой водопотребителем из реки для использования за пределами водотока;
- девятая — суммарный накопленный расход воды в реке по створу.

Статьи с первой по шестую являются приходной частью баланса. Статьи седьмая и восьмая представляют расходную часть баланса.

Расходы воды по статьям 1 и 2 обычно получают гидрологическим расчётом на основе модулей стока принятой обеспеченности и водосборной площади. Суммарный сток в базовом створе, на котором ведутся гидрометрические наблюдения, получается не равным накопленной сумме и речному стоку, рассчитанному по результатам наблюдений в базовом створе. Для этого створа за основу принимается обеспеченный расход, полученный на основе обработки результатов измерений. Разница между принятым расходом воды и полученным суммированием по статье 9 для базового створа составляет дефицит, либо профицит баланса.

Дефицит баланса устраняется добавлением попутных расходов воды по участкам пропорционально расстояниям между створами.

Профицит баланса устраняется сокращением расходов воды по притокам пропорционально их водосборной площади.

Баланс, в котором нет дефицитов и профицитов, является настроенным и пригодным для моделирования (с. 24).

Потоковая модель основного водотока реки Кача на текущий летний часовой расход													
	Часть 1. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС												
	Базовые расходы воды : створ "Выше пгт Емельяново" Q = 0,75, устье Q =1,192 м³/с												
	по основному руслу р. Кача для текущего летнего суточного расхода 04 июля 2003 г												
	Антропогенные воздействия по состоянию на 04.07.2003 г.												
Створ	Расход	Нараст.	Расход	Нараст.	Прирост	Нараст.	Отбор	Нараст.	Антропог.	Доля $\mu$	Доля $\mu$	Доля $\mu$	Доля $\mu$
	воды	итог	полупной	итог	воды	итог	на нужды	итог	доля,	(полное	остатка к	следующ.	остатка
притока	притока	воды	полупной	от людей	от людей	людей	отбора	ВСЕГО	%	разбавл.)	на 500 м	створу	(контроль)
Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	Ст. 6	Ст. 7	Ст. 8	Ст. 9	расхода				
А													
1. Р. Гладкая Кача	685,00	685,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	685,00	0,00	1,000	1,000	1,000
2. Р. Кругая Кача	447,45	1132,45	0,00	0,87	8,33	8,33	0,00	0,00	1141,65	0,73	0,399	1,000	1,000
3. Ниже п. Памяти 13	173,00	1305,45	40,00	40,87	0,00	8,33	0,00	0,00	1354,65	0,61	0,128	0,128	0,205
4. Руч. Тамасул.	24,00	1329,45	0,00	40,87	306,25	314,58	0,00	0,00	1684,90	18,67	0,196	0,196	0,433
5. Ниже руч. Тамасул	598,00	1927,45	10,00	50,87	0,00	314,58	0,00	0,00	2292,90	13,72	0,261	0,261	0,623
6. Выше пгт Емельяново	647,00	2574,45	48,50	99,37	0,00	314,58	0,00	0,00	2988,40	10,53	0,217	0,217	0,603
7. Р Еловка	295,00	2869,45	0,00	99,37	0,00	314,58	0,00	0,00	3283,40	9,58	0,090	0,090	0,166
8. Р. Малый Арей	272,00	3141,45	0,00	99,37	0,00	314,58	0,00	0,00	3555,40	8,85	0,077	0,077	0,095
9. С. Емельяново	0,00	3311,45	170,00	269,37	247,50	562,08	0,00	0,00	4142,90	13,57	0,101	0,101	0,217
10. Выше пос. Солонцы	210,00	3521,45	13,50	282,87	0,00	562,08	0,00	0,00	4366,40	12,87	0,048	0,048	0,110
11. Пос. Солонцы	0,00	3521,45	10,00	292,87	28,93	591,01	0,00	0,00	4405,33	13,42	0,020	0,020	0,021
12. Р. Бугач	47,88	3569,33	0,00	292,87	8,39	599,40	0,00	0,00	4461,60	13,43	0,013	0,013	0,046
13. УПМС. Устье р. Качи	0,00	3569,33	0,00	292,87	0,00	599,40	0,00	0,00	4461,60	13,43	0,000	0,000	0,002

Рис. 3. Водохозяйственный баланс реки Кача

Водохозяйственный баланс — это модель упорядоченного изменения расходов воды в живых сечениях водотока, по мере перемещения воды от истока к устью реки.

Водохозяйственный баланс, используемый для моделирования качества воды в реке, составляется в размерности расхода ( $\text{м}^3/\text{с}$  или  $\text{м}^3/\text{ч}$ ). Только в нем содержатся данные о расчетных расходах воды в реке, которые следует применять во всех разработках, связанных с любым использованием реки.

Настроенный баланс для реки Кача дан на с. 24. В потоковых моделях формирования качества воды применяются только такие балансы.

В таблицу баланса добавлены четыре столбца, необходимые для использования его в качестве основы гидрохимической модели, а также значения антропогенной доли  $K_q$  в расходе воды:

$$K_{q,k} = \frac{\sum_{i=1}^k Q_i^{(2)}}{Q_k^{(3)}};$$

где  $Q_i^{(2)}$  — расход внедрённой струи сточных вод номер  $i$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_k^{(3)}$  — расход воды в реке в створе  $k$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

В трёх графах представляется остаток внедрённой струи: выше места внедрения ( $\mu_k$ ), в контрольном створе ( $\mu_{500}$ ) и перед следующим створом ( $\mu_{k+1}$ ). Эти величины выбираются из таблицы гидравлического расчёта по условию:

$$\mu_{500} > \mu_{k+1} > \alpha_{k+1},$$

где  $\alpha_{k+1}$  — предельная величина для створа  $k+1$  (см. формулу 2).

Внедрённая струя сточных вод не зависит от расхода воды в принимающем водотоке (реке). Водохозяйственный баланс можно составлять на любой расход воды, если для этого условия известны показатели качества воды в створе естественного фона.

## 2.2. Характеристики водотока в створе

Для выполнения расчёта по детальному методу турбулентной диффузии А.В. Караушева необходимо рассчитывать коэффициент турбулентной диффузии. Для расчёта требуется знание скорости течения и средней глубины водотока. Как правило, такие величины при расчётном расходе воды не известны. В программном комплексе Гидрохимическая модель реки («ГХМодель», сертификат соответствия РОСС RU. ME20. H00084) был реализован следующий приём

расчёта макрометрических характеристик водотока при наличии информации только о расходе воды, уклоне водотока и коэффициенте шероховатости.

За основу расчёта была принята формула расчёта критической глубины для параболического русла [14]:

$$h_k = \left( \frac{27 \alpha Q^2}{64 gp} \right)^{0,25},$$

где  $\alpha$  — коэффициент Кориолиса;  $Q$  — Расход воды в реке,  $m^3/c$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести,  $m^2/c$ ;  $p$  — параметр параболы. Параметр параболы определяется на основе чертежа сечения водотока. Для р. Качи он оказался равным  $p=3,5$  и  $K_{kp} = 0,33\sqrt{Q}$ . Следовательно, средняя глубина  $H^{cp} = 2/3H_k = 0,22\sqrt{Q}$ , м. Остальные величины (ширина водотока, скорость течения и коэффициент Шези) рассчитываются по обычным формулам гидравлики.

Коэффициент турбулентной диффузии рассчитывается в установленном порядке.

Результат расчета для русла р. Качи достаточно точно совпадает с систематизацией глубин по р. Каче составленным А.В. Петенковым. Пример гидравлического расчёта для водохозяйственного баланса дан на с. 27. Шрифтом выделены значения, вводимые в таблицу дополнительно.

Таблица гидравлического расчёта отражает строение только части конкретной речной системы. Учтено расположение главных притоков и мест антропогенного воздействия. Соблюдается величина падения реки. Для этого сумма произведений расстояний между створами на соответствующие уклоны водотока равна геодезическому падению между истоком и устьем реки.

### 2.3. Другие исходные данные

Число, выражающее концентрацию любого вещества для каждого водотока, обязательно должно содержать не меньше трёх значащих цифр.

Для построения модели необходима информация о потоках вещества в истоке реки при расходе воды, представленном в водохозяйственном балансе. Обычно такая информация отсутствует. Поэтому до накопления данных по истоку реки она заменяется временной информацией об естественном фоне.

Потоковая модель основного водотока реки Кача на текущий летний часовой расход													
Часть 1. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС. Гидравлический расчёт (приложение к балансу)													
Створ для гидравлического расчёта	Расстояние между створами	Уклон поверхности водотока	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона	Косинус угла наклона
гидравлического расчёта	м	‰	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м
1. Р. Главная Кача	1,0	0,061	0,067	685,00	6,75	10,72	0,0105	2,45	0,13	0,60	1,000	0,000	1,000000
2. Р. Круглая Кача	3,0	0,006	0,067	1141,65	7,21	11,05	0,0041	9,45	0,15	0,22	1,000	0,693	1,000000
3. Ниже п. Памяти 13	2,0	0,006	0,044	1354,65	12,83	14,98	0,0033	5,78	0,16	0,40	0,110	0,205	1,000000
4. Руч. Тамасул.	1,0	0,0032	0,033	1684,90	18,84	19,19	0,0021	6,02	0,17	0,45	0,063	0,433	1,000000
5. Ниже руч. Тамасул	3,0	0,0034	0,035	2292,90	18,02	18,62	0,0026	7,12	0,19	0,46	0,059	0,623	1,000000
6. Выше пгт Емельяново	42,0	0,0029	0,033	2988,40	19,84	19,89	0,0026	7,99	0,21	0,49	0,026	0,603	1,000000
7. Р. Еловка	6,0	0,007	0,033	3283,40	20,01	20,01	0,0042	5,34	0,22	0,78	0,029	0,166	1,000000
8. Р. Малый Арей	1,0	0,0162	0,033	3555,40	20,16	20,11	0,0066	3,63	0,22	1,21	0,013	0,095	1,000000
9. С. Емельяново	1,0	0,006	0,033	4142,90	20,44	20,31	0,0043	6,35	0,24	0,77	0,031	0,217	1,000000
10. Выше пос. Солонцы	28,0	0,005	0,024	4366,40	29,90	26,93	0,0030	4,88	0,24	1,04	0,007	0,110	1,000000
11. Пос. Солонцы	3,0	0,0026	0,024	4405,33	29,93	26,95	0,0022	6,79	0,24	0,75	0,020	0,021	1,000000
12. Р. Бугач	3,0	0,002	0,024	4461,60	29,95	26,97	0,0019	7,79	0,24	0,66	0,004	0,046	1,000000
13. УГМС. Устье р. Качи	8,0	0,005	0,024	4461,60	29,95	26,97	0,0031	4,92	0,24	1,04	0,002	0,000	1,000000

Рис. 4. Гидравлический расчёт по створам реки Кача для водохозяйственного баланса

**Естественный фон** выражается концентрацией вещества в воде створа реки, расположенного выше мест зарегистрированного сброса сточных вод или стока с застроенной территории. Концентрация вещества в воде створа естественного фона должна соответствовать гидрологическому периоду, представляющему расчётный расход воды в водохозяйственном балансе. Расчёт такой концентрации приходится вести против течения воды вверх от базового створа до створа естественного фона. В соответствии с уравнением баланса потоков консервативного вещества для расчёта предлагается формула:

$$(7) \quad C_{1,j} = \frac{C_{k,j} - \sum_{i=2}^k \alpha_i C_{i,j}}{\alpha_1},$$

где  $C_{1,j}$  — плотность потока вещества в створе естественного фона, г/м<sup>3</sup>;  $C_{k,j}$  — приведённая средняя концентрация вещества в базовом створе, г/м<sup>3</sup>;  $\alpha_i C_{i,j}$  — доля учитываемой концентрации в каждом вышележащем створе, г/м<sup>3</sup>;  $\alpha_1$  — доля расхода воды в створе естественного фона от расхода воды в базовом створе. Расчёт будет тем точнее, чем точнее концентрация сточных вод будет соответствовать максимальному потоку вещества в сточных водах, и чем меньше средняя концентрация вещества  $C_{k,j}$  отличается от средней плотности потока этого вещества в базовом створе.

При расчёте не консервативного вещества для каждого потока вещества в сточных водах применяется коэффициент потери массы вещества, который определяется опытным путём для каждой реки и изменяет потоки вещества только в сточных водах.

**Боковая приточность.** Для каждого притока расчётная концентрация при заданном расходе воды принимается равной концентрации в истоке притока или в створе естественного фона. Для рассеянной боковой приточности, определённой при составлении баланса, в качестве расчётной принимается концентрация в истоке реки (или в створе естественного фона), если иное не определено исследованиями.

**Сточные воды.** Для характеристики сточных вод принимается максимальный за сутки часовой (секундный) поток вещества. Для этого концентрация вещества в сточных водах, измеряется в пробе, отобранной при расходе сточных вод, равном расходу воды по статье «Сточные воды», принятому в водохозяйственном балансе. В некоторых случаях, ради однообразия расчётов, в базу данных включается

не поток, а концентрация вещества, найденная измерением в вышеуказанном порядке. Использование отчётности 2-гп(водхоз) не рекомендуется, так как данные искажены за счёт вычета неизвестного фона.

## 2.4. Баланс потоков вещества в струях реки

По расходам воды, взятым из водохозяйственного баланса, и концентрациям, взятым из базы данных, рассчитываются потоки вещества в каждом элементе баланса, как произведение расхода воды на концентрацию вещества  $Q_i \cdot C_{i,j}$ . Для отбора воды из реки принимается средняя концентрация вещества, полученная расчётом для предшествующего створа.

Таблица-перечень потоков вещества в струях воды в реке последовательно по створам притоков, местам изъятия воды из реки и сбросов сточных вод, составляет баланс потоков вещества в реке (потоковый баланс). Баланс потоков вещества составляется отдельно для каждого вещества, принятого к расчёту.

Балансовая таблица состоит из двух частей (с. 30). Часть собственно баланса потоков вещества и дополнительные графы с плотностями потоков вещества. В строке баланса вычисляются потоки вещества по каждой статье баланса и с нарастающим итогом. В девятой статье содержится суммарный поток вещества в створе реки. В дополнительных графах помещаются плотности потоков вещества:

- — в определяющей струе фона выше места внедрения притока (сточных вод);
- — в контрольном створе на удалении 500 м;
- — средняя по водотоку.

Следующая графа содержит коэффициент антропогенного воздействия на речную воду  $K_p$ , как отношение накопительной суммы потока веществ со сточными водами к общему потоку веществ в створе.

Такая структура потокового баланса обеспечивает расчёт плотностей потоков вещества в каждой струе и средней плотности вещества в водотоке и обеспечивает анализ эксплуатации реки от её верховьев до устья.



Потоковая модель основного водотока реки Кача на расчетный часовой расход														
Часть 3. Потоки веществ в водотоках														
Таблица 3.2 Баланс потоков потребления кислорода по БПК <sub>5</sub>														
	Поток в припое	Итого токов	Итого при-токов	Поток токов	Итого полуполный	Итого полных	Поток полных	Итого полных	Итого полных	Итого полных	Итого полных	Итого полных	Итого полных	Итого полных
	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	Ст. 6	Ст. 7	Ст. 8	Ст. 9	Ст. 10	Ст. 11	Ст. 12	Ст. 13	Ст. 14
1. Р. Гладкая Кача	1164,5	1164,5	0	0	0	0,0	0	0	1164,5	1,70	1,70	1,70	0,00	1,7
2. Р. Крутая Кача	760,67	1925,2	0	0	45,815	45,8	0	0	1971	1,70	1,70	1,77	2,32	2
3. Ниж. п. Памяти 13	294,1	2219,3	68	68	0	45,8	0	0	2333,1	1,73	1,77	1,76	1,96	2
4. Руч. Тамасул.	120	2339,3	0	68	4103,8	4149,6	0	0	6556,8	1,72	1,76	6,53	63,29	2
5. Ниж. руч. Тамасул	1016,6	3355,9	17	85	0	4149,6	0	0	7590,4	3,89	3,92	2,54	54,67	1,9
6. Выше ппг Емельяново	1099,9	4455,8	82,45	167,45	0	4149,6	0	0	8772,8	3,31	3,34	2,35	47,30	2,4
7. Р. Еловка	590	5045,8	0	167,45	0	4149,6	0	0	9362,8	2,94	2,99	2,82	44,32	2,1
8. Р. Малый Арей	1686,4	6732,2	0	167,45	0	4149,6	0	0	11049	2,85	2,90	3,21	37,56	2,4
9. С. Емельяново	0	6732,2	289	456,45	3712,5	7862,1	0	0	15051	3,11	3,15	4,39	52,24	2,4
10. Выше пос. Солонцы	357	7089,2	22,95	479,4	0	7862,1	0	0	15431	3,63	3,73	3,51	50,95	3,9
11. Пос. Солонцы	0	7089,2	17	496,4	3703	11565,1	0	0	19151	3,53	3,63	6,22	60,39	5
12. Р. Бугач	464,44	7553,6	0	496,4	83,9	11649,0	0	0	19699	4,35	6,10	6,27	59,13	4,5
13. Устье р. Качи	0	7553,6	0	496,4	0	11649,0	0	0	19699	4,42	6,15	6,15	59,13	4,4

Рис. 5. Потоковый баланс для р. Качи по потреблению кислорода (БПК<sub>5</sub>) в 2003 г



## 2.5. Плотность потока вещества в струе

**Фоновая струя.** Плотность потока рассчитывается на основе данных о плотности потока вещества в струе от предыдущего створа по формуле:

$$(8) \quad C_{k,j}^{(3)} = \frac{\mu_{z,k-1} \Pi_{k-1,J}^{(2)}}{Q_k^{(2)}} + (1 - \mu_{z,k-1}) C_{k-1,J}^{(1)},$$

где  $\mu_{z,k-1}$ , выбрана из таблицы водохозяйственного баланса,  $\Pi_{k-1,J}^{(2)}$  — поток в струе, взята из статьи 5 предыдущей строки потокового баланса.  $C_{k-1,J}^{(1)}$  — плотность потока вещества в фоновой струе, взятой из результата расчёта предыдущей строки потокового баланса;  $Q_k^{(3)}$  — расход воды из водохозяйственного баланса по ст. 9. Здесь первый член представляет долю остатка, а второй - долю фона. В отличие от смешения по формуле 1 концентрация вещества в струе содержит только часть фоновой концентрации.

**В створе контроля** плотность потока в струе определяется по формуле 8, но с использованием всех данных по текущему створу.

**Средняя концентрация** рассчитывается как отношение суммы потока вещества (ст. 9) к сумме расхода воды, взятого из водохозяйственного баланса (ст. 9).

**Измеренная концентрация** включается в баланс, если выполнено маршрутное изучение потоков веществ в реке. В 2003 г. такое комплексное исследование речных и сточных вод было выполнено компетентными организациями по заданию Енисейского бассейнового водного управления.

## 3. Графическое представление модели

Графическое представление результатов расчёта потокового баланса и концентраций веществ позволяет упростить анализ использования реки для сброса потоков веществ. В практике управления потоками веществ применялись различные графические представления. Наиболее информативным оказались два изображения: потоки вещества с коэффициентами антропогенной нагрузки на водоток и плотности потоков вещества в струях водотока.

**Потоки вещества и антропогенные доли использования реки** показаны на рис. 6. В данном случае вместо вещества рассматривается величина биохимического потребления кислорода из воды.

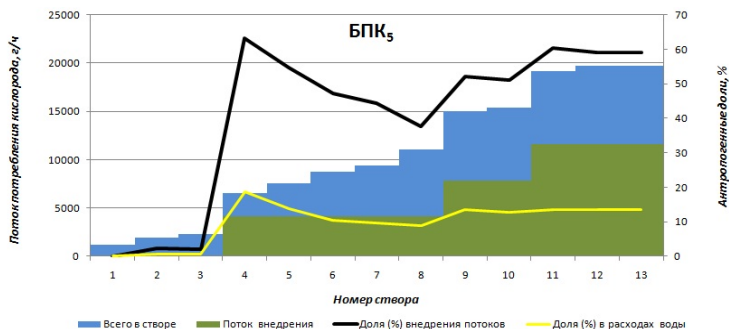


Рис. 6. Нагрузка на водоток по БПК на протяжении р. Качи в 2003 г.

Диаграммы составлены по данным, взятым из статей №6 и №9 потокового баланса. График доля антропогенных расходов ( $K_q$ ) в речном водотоке построен на основе водохозяйственного баланса, а график доля антропогенных потоков вещества ( $K_p$ ) по данным потокового баланса. Первый створ — это исток реки. Здесь антропогенные воздействия отсутствуют, поэтому  $K_q = K_p = 0$ . На втором створе в р. Качу поступает приток Крутая Кача, который несёт очищенные сточные воды, поднявшие влияние по расходу воды до 0,7 %, а по потоковой нагрузке — до 4,4%. На четвёртом створе с водой ручья Тамасул в реку поступили сточные воды после биологической очистки. Коэффициент доли расхода сточных вод в расходе водотока возрос до 17%, а  $K_p$  превысил 63%, что свидетельствует о чрезвычайной нагрузке на водоток по потоку вещества.

На створах 4-8 антропогенное воздействие было стабильным, а притоки реки принесли не только воду (что понизило  $K_q$  до 10%), а и потоки органических веществ, что увеличило общее потребление кислорода, но антропогенная доля потока потребления снизилась до 38%.

На пятом створе добавился поток вещества за счет струи очищенных сточных вод. На одиннадцатом створе в реку сброшены неочищенные сточные воды от посёлка Солонцы в количестве  $12,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  с потоком потребления кислорода около  $3700 \text{ г/ч}$ . Нагрузка в устье реки стала характеризоваться коэффициентами  $K_q = 0,134$ ,  $K_p = 0,60$ .

**Самоочищение.** Учет «самоочищения» выполняется за счёт сокращения потока вещества по мере продвижения струи в русле реки.

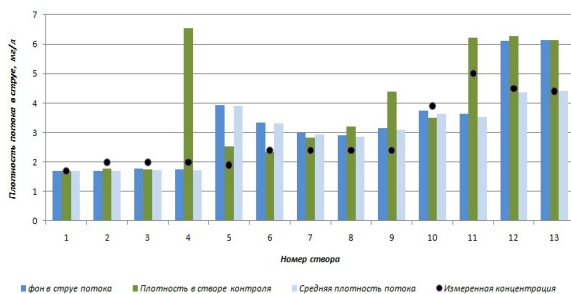


Рис. 7. Расчётная плотность потока биохимического потребления кислорода в струе и измеренная концентрация потребления его в воде р. Качи в 2003 г.

Для расчёта цепочки трансформации азотов (аммонийный — нитритный — нитратный) к соответствующим таблицам баланса добавляются таблицы расчёта превращённого потока азота в струях сточных вод.

Для расчёта потоков азота нитритного в дополнительной таблице устанавливается количество граф на единицу больше количество струй, содержащих азот аммония. В строке, соответствующей положению струи, проставляется ноль. Для каждой струи рассчитывается поток азота нитритного, образовавшегося из потока азота аммония на пути между створами. Затем вычисляются суммарный поток азота нитритного в каждом створе и вносится в дополнительную графу. Полученные суммы вычитают из потока азота аммонийного при расчёте плотности остатка его в струе по статьям 6 и 9.

Эти же суммы добавляют в баланс потоков азота нитритного (ст. 6 и ст. 9). Затем строят дополнительную таблицу и рассчитывают потоки образовавшегося азота нитратного. Далее поступают аналогично изложенному, снижая поток азота нитритного и увеличивая поток азота нитратного. На этом расчёт трансформаций азота завершается.

**Плотность потока и измеренная концентрация вещества** показаны на рисунке 7 для струй, перечисленных выше. Характерно, что результаты анализов практически находятся в пределах допустимой ошибки метода анализа. Исключение составляет концентрация по створу 4. Пробы, отобранные у левого берега, позволили ошибочно считать чистой воду на участке 4-6.

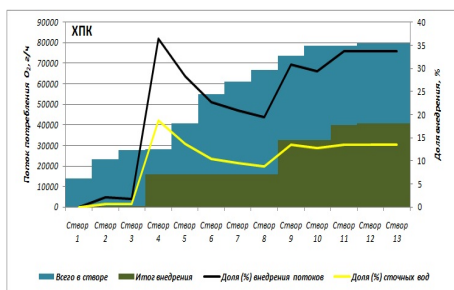


Рис. 8. Нагрузка на водоток по ХПК на протяжении р. Качи в 2003 г.

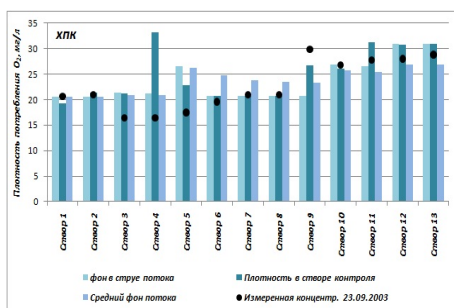


Рис. 9. Расчётная плотность потока химического потребления кислорода в струе и измеренная концентрация потребления его в воде р. Качи в 2003 г.

Аналогичными свойствами характеризуется эксплуатация р. Качи при оценке по химическому потреблению кислорода (рисунки 8 и 9) и суммарно по веществам, отнесённым к токсикологическому признаку вредности.

**Прогностические возможности модели.** Возможности модели основаны на чёткой аналитической основе всех расчетов. Это позволяет решать прямые, обратные и иные задачи. Практически решались три прогнозных задачи:

- расчёт качества воды в реке при изменении потоков веществ в сточных водах или изменении концентрации естественного фона.

Задача решается корректировкой базы данных с учётом результатов натуральных измерений концентрации в сточных водах или в створе естественного фона;

- определение целевого показателя качества воды в реке на основе предложений по технологии очистки сточных вод на предстоящий период. Задача решается введением в базу данных характеристик ожидаемой технологии обработки сточных вод;
- определение концентрации вещества "на конце трубы" при заданном целевом показателе качества воды в реке. Задача решается обратным счётом. В EXCEL — по опции "что, если ...".

#### 4. Чувствительность модели

Чувствительность модели оценивается реакцией потокового баланса на изменение нагрузки на водоток.

В 2007 г. администрация г. Красноярска помогла Емельяновскому району отвести сточные воды пос. Солонцы на городские очистные сооружения — за пределы бассейна р. Качи. В результате в устье реки установилась нагрузка на водоток в размере 15912 г/ч, что соответствует антропогенной доле  $K_p = 0,494$ . Сокращение составило 22%. Средняя концентрация в устье реки снизилась на 22% (3,6 мг/л), а максимальная — на 41%. Сброс сточных вод сократился на ничтожно малую величину - 2%.

Р. Кача в 1970-1987 гг. считалась наиболее грязным притоком Енисея. В створе №8 потребность в кислороде достигала 1300 г/м<sup>3</sup>, а в устье реки превышала 450 г/м<sup>3</sup>.

Управление потоками веществ осуществлялось по данным АС-КВод «Енисей», содержавшей потоковую модель реки (в пересчёте на водоёмкость). При задании условий осуществления водоохраных мероприятий расход сточных вод не ограничивался. Сброс сточных вод в бассейне реки возрос более, чем в 5 раз. Задача охраны вод ограничивалась [15] требованием сокращения потоков веществ, содержащихся в сточных водах, намечаемых для сброса в реку после очистки. Она решена до уровня технологий, существовавших на 1987 г., и принесла убедительный результат.

## 5. Обобщение

Потоковая модель антропогенной нагрузки и формирования качества воды в реке обеспечивает все нужды эффективного управления воздействиями на речную воду. Водоохранные мероприятия в бассейне реки Кача были разработаны на основе потоковой модели. Состоянием воды в р. Кача после реализации мероприятий доказывает соответствие потоковой модели природным процессам.

Допустимую антропогенную нагрузку на реку невозможно определять минуя процедуру нормирования нагрузки для конкретного места. Наиболее точна бассейновая разработка норм нагрузки одновременно для каждого участника водопользования. При этом учитывается взаимное влияние струй сточных вод. Потоковая модель создаёт возможность выполнить такой расчёт и, кроме того, систематически контролировать эффективность выполнения каждого водоохранного мероприятия.

Коэффициент антропогенной доли в расходах речной воды мало чувствителен к величине действительного антропогенного воздействия. Существующая оценка эффективности водоохранных мероприятий по сокращению расходов воды не выражает уровень воздействия сточных вод на речную воду, так как не учитывает качество сточных вод.

Оценка эффективности воздействия сточных вод на реку на основе изменения годовых масс веществ приводит к ошибке в связи с природным отсутствием накопления вещества в реке. Такая оценка фактически направлена на оценку антропогенного поступления веществ в моря.

Поток вещества — единственная величина, связывающая антропогенную нагрузку с изменением качества воды в струях реки. Оценка эффективности водоохранных мероприятий по изменению суммы потоков вещества пригодна для отражения действительного влияния сточных вод на речные воды по территориям, бассейнам рек и по стране.

Доли антропогенного потока вещества в реке наиболее точно выражает степень вмешательства человека в природный процесс в пределах бассейна реки.

## Список литературы

- [1] Давыдов Л. К., Дмитриева А. А., Конкина Н. Г. Общая гидрология. Ленинград : Гидрометеиздат, 1973. — 462 с. ↑[]
- [2] Леви И. И. Инженерная гидрология. Москва : Высшая школа, 1967. — 270 с. ↑[]
- [3] Алекин О. А. Основы гидрохимии. Ленинград : Гидрометеиздат, 1970. — 444 с. ↑[]
- [4] Маккавеев В. М. *О распространении растворов в турбулентном потоке и о химическом методе измерения расхода* Записки ГГИ. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1933, с. 229–246. ↑[]
- [5] Караушев А. В. *Турбулентная диффузия и метод смешения* // Труды НИУ ГУГМС. Сер. IV. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1946, с. 82, вып. 30. ↑[]
- [6] Черкинский С. Н. Санитарные условия выпуска сточных вод в водоёмы. Москва : Издат. лит. по стрoит., 1951. — 90-106 с. ↑[]
- [7] Методические основы оценки антропогенного влияния на качество поверхностных вод / ред. Караушев А. В.. Ленинград : Гидрометеиздат, 1981. — 32-54 с. ↑[]
- [8] Дружинин Н. И., Шишкин А. И. Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши. Москва—Ленинград : Гидрометеиздат, 1997. — 383 с. ↑[]
- [9] Белолипецкий В. М., Шокин Ю. И. Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды. Новосибирск : «ИНФОЛИОпресс», 1997. ISBN –89590–0,04–6. — 240 с. ↑[]
- [10] Применение математических методов к прогнозированию и управлению качеством воды в речных бассейнах. Киев : Наукова думка, 1979. — 154 с. ↑[]
- [11] Методические указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. Москва : МПР Российской Федерации, 2008. — 80 с. ↑[]
- [12] Знаменский В. А. Струйные процессы в водотоках. Красноярск : Издательство СФУ, 2010 (в печати). — 108 с. ↑[], 1
- [13] Знаменский В. А., Пономарёва Л. С. Опыт разработки и эксплуатации автоматизированной системы контроля эффективности водоохраных мероприятий в бассейне р. Енисей (АСКВод «Енисей») // Экспресс информация ЦБНТИ Минводхоза СССР. Серия 4. Москва, 1985. — 46 с., вып. 10. ↑1
- [14] Киселёв П. Г. Справочник по гидравлическим расчётам. Москва—Ленинград : Госэнергоиздат, 1957. — 352 с. ↑2.2
- [15] Знаменский В. А. Управление потоками веществ, сбрасываемыми в реки. Красноярск : Инст. физики им. Л.В.Киренского СОАНРФ, 2005. — 162 с. ↑4

V. A. Znamenskiy. *Anthropogenic load model and water quality forming for the river.*

АБСТРАКТ. The paper contains a description of the theoretical principles that lead to the construction of the model. The model is based on the theory of matter fluxes joining by combining jets of a watercourse. As an example, the real model of human impacts on river Kacha is presented, left tributary of Yenisey river. The model is used to estimate the load of flows substances discharged from wastewater on the river and performance comparison with results of field measurements is given. The model sensitivity to changes in load is estimated.

*Key Words and Phrases:* stream watercourse, mass flux, water balance in the river, hydrologic water balance, flux density, anthropogenic part.

*Образец ссылки на статью:*

В. А. Знаменский. *Модель антропогенной нагрузки на реку и формирования качества воды в реке* // Программные системы: теория и приложения : электрон. научн. журн. 2010. № 2(2), с.15–38. URL: [http://psta.psisras.ru/read/psta2010\\_2\\_15-38.pdf](http://psta.psisras.ru/read/psta2010_2_15-38.pdf)