

# SEDIMENTLOAD

Руководство пользователя  
ВЕРСИЯ 0.1 Март 2021

## Содержание

Перечень обозначений и сокращений .....	2
Общие сведения .....	2
Обзор моделей распространения взвешенных веществ .....	2
Руководство пользователя по модели «SedimentLoad» .....	6
Общие сведения .....	6
Численное решение .....	7
Входные данные .....	7
Запуск модуля: .....	9
Результаты расчетов .....	13
Примеры применения модели «SedimentLoad» .....	14
Пример 1. Расчет распространения шлейфа мутности от открытых карьеров разработки полезных ископаемых по р. Интриган и р. Омчак (бассейн р. Теньке) .....	15
Пример 2. Расчет транспорта шлейфа мутности и осаждения взвеси ниже разработок россыпной платины Сейнав-Гальмознанского горного узла (бассейн р. Вывенки) ....	18
Пример 3. Расчет транспорта техногенных наносов ниже разработок россыпной платины Кондерского месторождения (бассейн р. Мая) .....	23
Литература .....	27

## Перечень обозначений и сокращений

$S$  – мутность воды,  $v$  – скорость течения,  $t$  – время,  $LA$  – расстояние осаждения частицы,  $R$  – расход взвешенных наносов,  $n$  – размер частиц,  $w$  – гидравлическая крупность

## Общие сведения

Настоящие методические указания разработаны для использования модели «SedimentLoad» - средства моделирования распространения взвешенных веществ и донных отложений, а также расчета гидрологических параметров, необходимых для исчисления размера вреда тихоокеанским лососям и гольцам (*Salvelinus*) при хозяйственной деятельности в руслах рек Дальнего Востока.

Методические указания включают в себя основные наработки в части обзора моделей, руководства пользователя и примеры использования разработанного программного обеспечения.

## Обзор моделей распространения взвешенных веществ

Проблема распространения взвешенных веществ и расчета гидрологических параметров, необходимых для исчисления размера вреда тихоокеанским лососям и гольцам (*Salvelinus*) при хозяйственной деятельности широко рассматривается в литературе в связи с тем, что минеральные частицы, которые сорбируют органические и неорганические примеси, оказывают значительное влияние на экологическое состояние русла и содержание загрязняющих веществ. 90 % выноса тяжелых металлов связано с их адсорбцией на взвеси [A geomorphological approach..., 2006]. Отсутствие и недостаток гидрометрических наблюдений определяет необходимость разработки специальных численных решений и создание соответствующих систем моделирования.

Теоретической основой для моделирования переноса взвешенных веществ и определения мутности воды  $S$  служит допущение о влиянии гидравлической крупности частиц и скоростных условий водного потока на перемещение материала вниз по течению во взвешенном состоянии до приёмного водоёма, или аккумуляцию и переход в состав донных отложений на каком-либо участке реки. При повторном взмучивании осадков, вызванных изменением таких гидрологических условий, как повышение водности при паводках и половодьях, приводящих к русловым переформированиям, вновь происходит увеличение концентрации взвешенных веществ в водной среде [Lick, 2009]. Процесс перемещения взвесей по русловой сети зависит от сочетания большого числа факторов: гидравлических условий, характера русловой сети, концентрации растворённых и взвешенных веществ, гранулометрического состава наносов, фазы водного режима и др. Все эти процессы имеют сложную природу, однако, благодаря определённым упрощениям, могут быть описаны с помощью математических формул, основывающихся на физических законах. Это, в свою очередь, позволяет исследовать поведение взвеси в водном потоке с помощью численных методов.

Существует большое число моделей, описывающих транспорт наносов в реках. Они отличаются пространственной и временной размерностью, которая необходима для описания большого количества процессов, оказывающих значительное влияние на перемещение наносов. Среди наиболее важных, определяющих режим речных наносов, считаются: интенсивность эрозии, гранулометрическая крупность наносов, скорость осаждения частиц, интенсивность аккумуляции, степень флокуляции частиц, цементированность донных отложений, влияние эрозии на сток взвешенных и влекомых наносов. В действительности, большинство моделей не включают точное описание всех этих процессов. Конечный выбор размерности модели, процессов, описывающих транспорт

наносов, способов их описания и приближения зависит от компромисса между важностью каждого процесса и возможностью точно описать данный процесс, ожидаемой точностью результатов, доступностью данных для описания процессов, задания граничных условий и верификации модели, количеством требуемых расчётов [Julien, 2010].

Одной из главных характеристик моделей является их размерность, т.е. число пространственных координат, по которым описывается процесс изменения примеси в водном объекте. Выделяют одно-, двух- и трёхмерные модели (1-D, 2-D, 3-D модели, соответственно). Модели также различаются по коммерческой стоимости (в первую очередь, можно разделить бесплатные продукты для некоммерческого использования и платные программные средства). Большую роль для решения практических задач играет совместимость в ГИС-пакетами, наличие пользовательского интерфейса и др. В **таблице 1** приведен обзор наиболее широко известных систем моделирования. Кроме указанных в таблице недостатков, общей проблемой является отсутствие программных средств, позволяющих выполнить расчеты требуемых гидрологических параметров в условиях ограничения исходных данных.

**Таблица 1** — Обзор некоторых методов и моделей для оценки, расчета или прогноза изменений концентрации примеси (взвеси) в реках

Програм. комплекс	Результат расчета	Правообладатель	Коммерческая стоимость в России, млн. рублей	Недостатки
MIKE 3	Концентрация примеси по глубине, ширине и длине водотока в различные моменты времени после ее поступления в водоток	ДНІ (Дания)	2,7	Высокая стоимость; большое количество необходимых входных данных; сложность расчётов
MIKE 21	Осредненные по глубине значения концентрации примеси, изменяющиеся по ширине и длине водотока	ДНІ (Дания)	2,2	Высокая стоимость; комплекс сложен в использовании для протяжённых участков
RIVER STREAM 2D		Вычислительный центр РАН	0,6	
«Зеркало», «Охта», MIKE 11	Осредненная в поперечном сечении потока концентрация консервативной примеси	НПО «Логус», ДНІ, Алимов и др., 2002; ЮНЕСКО	По согласованию	Высокая стоимость, не решает задачу распространения шлейфа мутности и заиления
MIKE 11, WQMCAL	Средняя в поперечном сечении концентрация консервативной примеси в створе достаточного перемешивания	ДНІ (Дания), ЮНЕСКО	Бесплатный	Англоязычная; нацелена на расчёт только гидрохимических показателей; неприменима для протяжённых участков

Инженерный пакет программ (MIKE Basin)	Средняя в поперечном сечении концентрация консервативной и неконсервативной примеси по длине рек с боковыми притоками	ДНІ (Дания)	По согласованию	Высокая стоимость; расчёты позволяют управлять водными ресурсами, слабое внимание уделено качеству воды
HEC-RAS	Расходы наносов для расчетных створов	Инженерный корпус сухопутных войск, США	Бесплатный	Англоязычная, зависимость от выбора расчетных формул стока наносов
GSTARS 1,2,3	Расходы наносов для расчетных створов	Бюро мелиорации США	Бесплатный	Англоязычная; технические проблемы для применения к протяжённым участкам
TELEMAC	Расходы наносов для расчетных створов	Artelia (Франция), BAW, (Германия), SETMEF, (Франция) и др.	Бесплатный	Отсутствие удобного интерфейса; модель недоработана; необходимость знания языков программирования

Трёхмерное моделирование оправдывает себя в случае, когда невозможно пренебрегать глубиной водного потока (эстуарии, порты, испытывающие влияние приливов), при локально сосредоточенных выбросах, а также при краткосрочных и среднесрочных расчётах [Malcherek, 2001]. Крупномасштабное моделирование продолжительных процессов возможно только при применении 1- или 2-D моделей, что вызвано ограниченностью расчётных возможностей [Fischer, 1967]. При допущении, что перемешивание взвесей в водном объекте является полным, одномерные модели адвекции могут быть применены для прогнозирования транспорта взвеси для продолжительных участков [Sediment dynamics..., 2007]. Таким образом, модели любого пространственного разрешения объединяет единый механизм распространения примеси в реках – диффузия, которая описывается на основе численного решения уравнений адвекции примеси Экснера. Главным отличительным признаком моделей являются технические параметры, такие как удобство пользовательского интерфейса, скорость выполняемых операций. Все эти модели требуют большого объема исходных данных (включая батиметрию русла) на протяженные участки русловой сети (например, охватывающие многокилометровые зоны распространения шлейфа мутности), которые, как правило, недоступны, что затрудняет их использование для расчета гидрологических параметров, необходимых для исчисления размера вреда тихоокеанским лососям и гольцам (*Salvelinus*) при хозяйственной деятельности в руслах рек Дальнего Востока.

Требования ряда нормативных документов, приказа Росрыболовства от 25 ноября 2011 г. № 1166 «Об утверждении методики исчисления размера вреда...» о проведении расчетов распространения шлейфов мутности, объемов заиления и площадей зон заиления привело к появлению большого числа программных продуктов, имеющих коммерческий заказ (типа Зеркало ++ ) или подготовленных в рамках конкретных проектов. Эти продукты созданы по заказу инженерных предприятий, нацеленных на проведение оперативных расчетов для целей изысканий и проектирования. Все разработанные в инженерной среде

программные комплексы основаны на функциях экспоненциального уменьшения мутности воды ниже участка воздействия, приведенных в уравнениях в РП.1.204-1-84, СТО ГГИ 08.29–2009. Их важным недостатком является то, что апробация результатов расчета на натурном материале не проводилась. Наибольшее известное решение, вошедшее в СТО ГГИ 08.29–2009, предполагает допущение о ламинарности потока (рисунок 1): частица переносится за время  $dt$  со скоростью вниз по течению потока на некоторое расстояние и оседает под действием силы тяжести со скоростью  $w$  на высоту  $w dt$ . Длина траектории транзита примеси в ламинарном потоке от точки  $x=0$  (частица на свободной поверхности) до точки  $x=L$  ( $L$  – расстояние, на котором частица выпадет на дно) прямо пропорционально глубине и скорости потока и обратно – гидравлической крупности потока [Гиргидов, 2003].

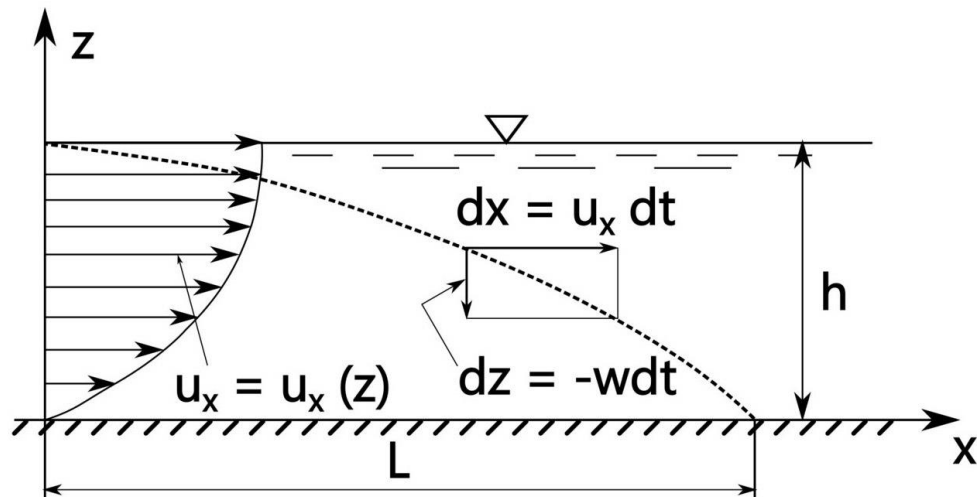


Рисунок 1 — Схематизация осаждения взвешенных частиц в ламинарном потоке

В специализированных программных комплексах, созданных в инженерной практике Российской Федерации, используется математическая модель, основанная на теории турбулентной диффузии и функциях экспоненциального уменьшения мутности воды ниже участка воздействия. Исходные данные в них задаются в виде одного значения (средней глубины) и осредненной скорости в характерные фазы водного режима. Подобные уравнения приведены РП.1.204-1-84 («Методическое руководство по проектированию. Кабельные переходы связи через водные преграды с учетом требований охраны окружающей среды»), СТО ГГИ 08.29–2009 и др. Для проведения расчетов использовались следующие исходные данные для каждого участка работ: данные о гранулометрическом составе грунта, расход воды ( $m^3/сек$ ), ширина (м), глубина(м) и скорость течения (м/сек), данные о механизмах для проведения работ на различных участках, объем перемещаемого грунта ( $m^3$ ), производительность механизма ( $m^3/час$ ) и длительность работ (час), параметры участка: длина (м) и ширина фронта (м). Некоторые из таких моделей входят в структуру программных комплексов «Зеркало» и «Охта». При существенной схематизации процесса эти модели обеспечивают пользователя рядом полезных сведений о длительности превышения допустимых концентраций в результате поступления в воду загрязняющих веществ, расстоянии, на котором достигаются нормативы по содержанию в воде примесей, изменению кратности разбавления, характеристик зоны смешения и т.п. (табл. 1).

Во многих случаях создаются программные комплексы непосредственно под конкретную задачу на языках программирования в виде консольных приложений. Пример подобных наработок приведен в проектной документации по объекту «Строительство Багаевского гидроузла на р. Дон» (государственный контракт №03-16-ОК от 10.11.2016 года между Федеральным бюджетным учреждением «Администрация Азово-Донского бассейна внутренних водных путей» (ФБУ «Азово-Донская бассейновая администрация»)

и акционерным обществом «Акватик»), где для расчета распространения взвесей использована созданная на языке C++ консоль расчета «лепестков» мутности для разных глубин, а также файл с параметрами «пятна осадка». Согласно данным, приводимым в отчете [Проектная документация..., 2017] данные из этих файлов импортировались в файл Excel и использовались исключительно для иллюстраций. При коммерческой выгоды этих продуктов их важным и основным недостатком является то, что апробация результатов расчета на натурном материале не проводилась.

Таким образом, все существующие модели требуют большого объема исходных данных (включая батиметрию русла) на протяженные участки русловой сети (например, охватывающие многокилометровые зоны распространения шлейфа мутности), которые, как правило, недоступны, что затрудняет их использование для расчета гидрологических параметров, необходимых для исчисления размера вреда тихоокеанским лососям и гольцам (*Salvelinus*) при хозяйственной деятельности в руслах рек Дальнего Востока. Реализация принципов гидродинамического моделирования, всех классов (от одно- до трехмерных) и основанных на использовании всех указанных продуктов, требует достаточно большого объема исходной информации (данные о морфометрии рек, особенностях гидрологического режима и др.). Основным по трудоемкости типом информации является морфометрия русла, даже в простейших одномерных моделях требующая построения поперечных профилей, которые назначаются в характерных местах речной долины – расширениях и сужениях русла и поймы, изменения морфодинамического типа русла. Как правило, для каждого из поперечных профилей вводятся *первичные данные*, содержащие пары точек «расстояние от постоянного начала  $X$  - абсолютная отметка дна -  $Z$ », относительные сопротивления (отношение коэффициента шероховатости в точке к его фоновому значению для участка русла), географические координаты концов профиля - правого и левого берега (рис. 2). В результате объем необходимых исходных данных составляет десятки и сотни километров промерных работ по длине русловой сети.

В этой связи альтернативным является создание численных решений, использующих расчетные значения морфометрии рек и характеристик водности рек на основе региональных гидролого-морфометрических зависимостей, общедоступных цифровых моделей рельефа, и индикационных характеристик параметров водотоков, что позволяет избежать дорогостоящих натурных изысканий. Такой экспертно-обобщенный подход положен в основу созданной модели *SedimentLoad*, ориентированной на исчисление размера вреда тихоокеанским лососям и гольцам (*Salvelinus*) при хозяйственной деятельности в руслах рек Дальнего Востока. Калибровка на обширном натурном материале, собранным коллективом ВНИРО в рамках мониторинговых исследований 2010-2017 гг. на реках Камчатки и Сахалина, позволяет впервые решить также вопрос оценки точности методов моделирования.

## Руководство пользователя по модели «*SedimentLoad*»

### Общие сведения

Модель «*SedimentLoad*» разработана на базе языка Питон и интегрирована в ГИС-пакета Esri ArcGIS for Desktop 10.1. Модель ориентирована на определение продольной трансформации стока взвешенных наносов в пределах гидрометрически неизученных речных систем. С ее помощью можно давать прогнозные оценки качества речных вод ниже разрабатываемых полигонов при заданных (планируемых) объемах поступления технических вод в русловую сеть. Моделирование перемещения техногенных наносов работает как с точечным (сброс сточных вод), так и с диффузионным (смыв с поверхности водосбора) характером поступления минеральных частиц в водный поток. Выходная информация «*SedimentLoad*» содержит сведения о продольном изменении концентрации каждой отдельной фракции взвешенных частиц (глина, ил, пыль, песок, мелкий и крупный

гравий) и общей мутности от створа воздействия вниз по реке (в кг/м<sup>3</sup>), а также об интенсивности наилконакопления на исследуемом участке русла (в мм/сутки).

Отличие разработанного программного обеспечения состоит в возможности оперативного сбора исходной информации на основе региональных общедоступных данных о морфологии и гидрологии рек, цифровых моделей рельефа открытого доступа, и индикационных характеристик параметров водотоков, что позволяет избежать дорогостоящих натурных изысканий.

Таким образом, модель ориентирована на широкий неограниченный круг пользователей.

### Численное решение

Моделирование перемещения техногенных наносов ориентировано на точечный (сброс сточных вод) или диффузионный (смыв с поверхности водосбора, в том числе добыча полезных ископаемых, лесоразработки) характер поступления минеральных частиц в водный поток. Выбранное численное решение предполагает допущение о ламинарном режиме осаждения (рис. 1), в соответствии с которым частица переносится за время  $dt$  со скоростью  $u_x = u_x(z)$  вниз по течению на некоторое расстояние  $dx = u_x dt$  и оседает под действием  $G_{тяж}$  со скоростью  $\omega$  на высоту  $dz = -\omega dt$ . В ламинарном потоке длина речной сети от точки  $x=0$  (частица на свободной поверхности) до точки  $x=L$  ( $L$  – расстояние, на котором частица выпадет на дно) рассчитывается по формуле:

$$LA = \int_0^L dx = \int_0^L \left( \frac{u_x dt}{dx} \right) dx = \int_h^0 u_x \left( -\frac{dz}{\omega} \right) = \frac{1}{\omega} \int_h^0 u_x dz = \frac{h\nu}{\omega}, \quad (1)$$

Для оценки этого расстояния численная схема использует автоматически определяемые осредненные значения гидравлических характеристик:

$$LA_n = 1,3 \frac{h_i \nu_i}{\omega_n} \quad (2)$$

где  $h_i$ ,  $\nu_i$  – средняя глубина потока (м) и средняя скорость течения (м/с) вдоль  $i$ -го сегмента речной сети,  $\omega_n$  – гидравлическая крупность (м/с) минеральных частиц  $n$ -ой фракции (мм), 1,3 – эмпирический коэффициент.

### Входные данные

Наполнение атрибутов линий осуществляется оператором в интерактивном режиме, при этом обязательно помечаются первый и последний сегмент водотока, между которыми необходимо восстановить изменение концентрации взвешенных частиц. Расходы воды с втекающих водотоков заносятся в атрибуты сегментов основного водотока, идущие сразу после створа, в котором происходит слияние. Таким образом, атрибутируются только сегменты основного водотока.

#### 1. ЦМР (цифровая модель рельефа)

Бесплатные интернет ресурсы для её скачивания:

<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/search.jsp>

<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>



## 2. Линейный shapefile речной сети

создается последовательностью действий в программе ArcGIS на базе цифровой модели (Рис. 2)

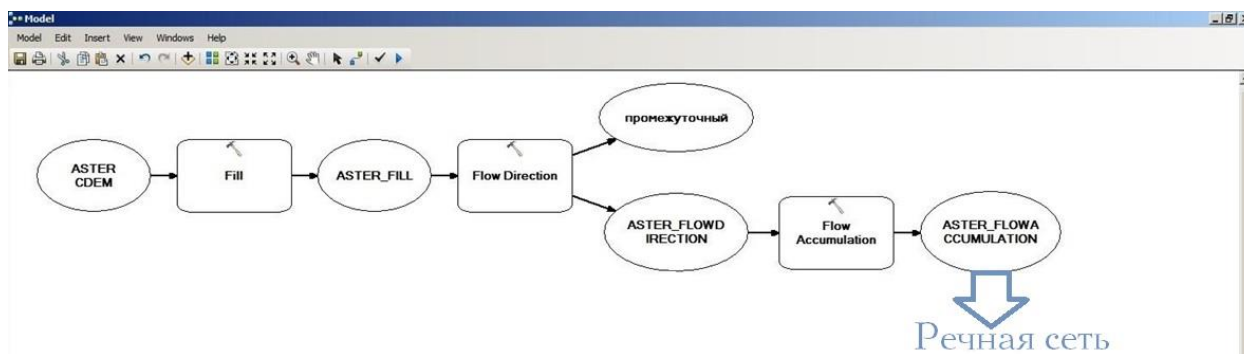


Рисунок 2 — Схема автоматизированного построения русловой сети в программном комплексе ArcGIS 10.1

В атрибутивной таблице линейного shapefile речной сети по её сегментам задаются (Рис. 3):

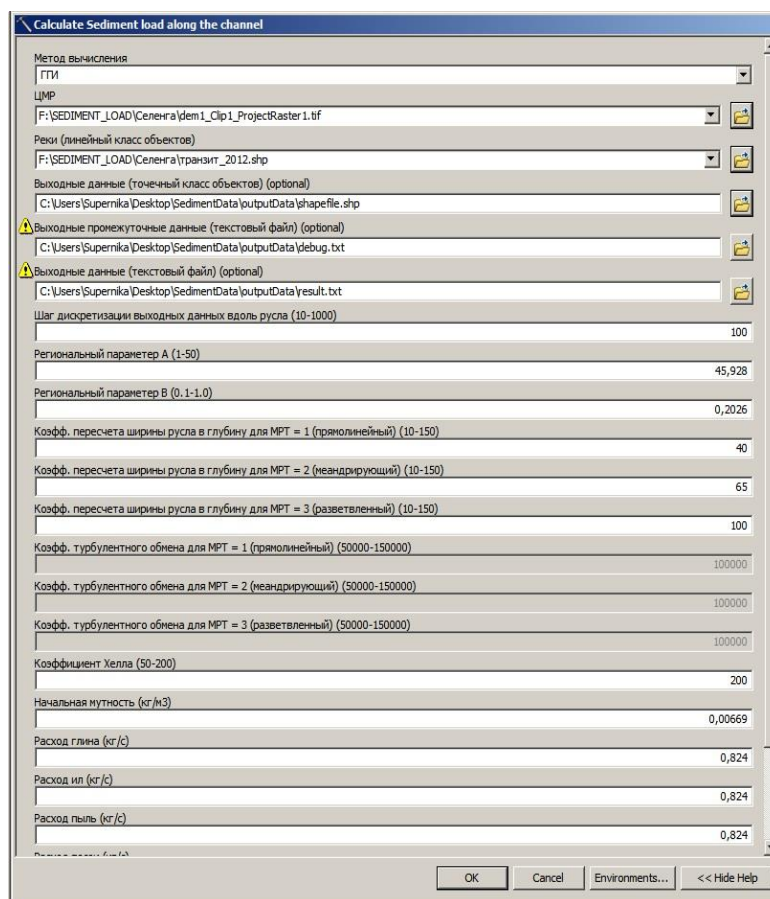
- расходы, ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) – колонка под названием «Qv»
- коэффициент шероховатости, n – колонка атрибутивной таблицы под названием «n»
- морфодинамический тип русла: 1 – прямолинейное, 2 – меандрирующее, 3 – разветвленное – колонка атрибутивной таблицы под названием «ChannelType»
- тип участка в последовательности: 1 – первый сегмент (створ воздействия); 2 – промежуточные сегменты (все сегменты речной сети кроме двух); 3 – замыкающий сегмент (замыкающий створ) – колонка атрибутивной таблицы под названием «StationType»
- мутность боковых притоков задается пофракционно: 6 колонок атрибутивной таблицы соответствуют шести фракциям (ил, глина, пыль, песок, мелкий и крупный гравий) – S1, S2, S3, S4, S5, S6, ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )

num	Shape	Le_1	L	Qv	N	ChannelTyp	StationTyp	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	6578,71561	6578,71561	1,37	0,03	2	1	0	0	0	0	0	0	0
28	32505,667378	32505,667378	48,71	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
25	39275,045569	39275,045569	48,31	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
26	51065,574032	51065,574032	48,4	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
27	19490,196662	19490,196662	48,66	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
24	1983,672841	1983,672841	44,35	0,03	1	2	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
23	50826,67072	50826,67072	44,22	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
22	10536,676479	10536,676479	43,98	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
21	186,419834	186,419834	43,94	0,03	1	2	0	0	0	0	0	0	0
20	24381,205779	24381,205779	39,54	0,03	3	2	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047
19	43619,057018	43619,057018	34,47	0,03	3	2	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036
18	18806,895465	18806,895465	34,32	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
17	18586,422405	18586,422405	33,69	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
16	27142,70546	27142,70546	30,94	0,03	2	2	0	0	0	0	0	0	0
15	57112,473285	57112,473285	30,9	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
14	29386,438711	29386,438711	14,15	0,03	3	2	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138
13	5100,980813	5100,980813	14,07	0,03	2	2	0	0	0	0	0	0	0
12	50720,648752	50720,648752	12,84	0,03	3	2	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096	0,0096
11	4532,626	4532,626	12,49	0,03	2	2	0	0	0	0	0	0	0
10	43560,598999	43560,598999	10,82	0,03	2	2	0	0	0	0	0	0	0
9	1134,093077	1134,093077	10,76	0,03	3	2	0,403	0,403	0,403	0,403	0,403	0,403	0,403
8	39619,239337	39619,239337	10,73	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
7	45732,826127	45732,826127	10,61	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
6	61637,811592	61637,811592	10,5	0,03	3	2	0	0	0	0	0	0	0
5	4710,938167	4710,938167	10,27	0,03	2	2	0	0	0	0	0	0	0
4	15572,102873	15572,102873	10,15	0,03	2	2	0,0771	0,0771	0,0771	0,0771	0,0771	0,0771	0,0771
3	109056,89104	109056,89104	5,24	0,03	2	2	0	0	0	0	0	0	0
2	46687,73308	46687,73308	5,16	0,03	2	2	0,089	0,089	0,089	0,089	0,089	0,089	0,089
29	10580,470672	10580,470672	48,76	0,03	2	3	0	0	0	0	0	0	0

**Рисунок 3** — Атрибутивная таблица исследуемого участка речной сети (начинка, выделенная голубым цветом, предварительно заполняется пользователем)

Запуск модуля:

Запуск модели осуществляется через инструмент TOOLBOX в программе ArcGIS.



**Рисунок 4** — Окно запуска модуля «SedimentLoad»

ЦМР – необходимо прописывать полный путь к файлу ЦМР;

Реки – это линейный участок русловой сети, разделенный пользователем на отдельные сегменты в соответствии с водностью потока и МТР, как и в случае с ЦМР необходимо прописать *полный* путь к файлу;

Выходные данные (точечный класс объектов) – этот shapefile представляет собой последовательность точек; открывается ArcGIS в виде атрибутивной таблицы. Её колонки (Рис. 5):

L – расстояние от стартовой точки расчета (створ воздействия);

N – номер точки русловой сети;

рассчитанные в рамках выбранного метода значения пофракционной (S1-6) и общей (SS) мутности в  $\text{грамм}/\text{м}^3$ .

пофракционной (W1-6) и общей (WW) скорости наилкообразования в  $\text{мм}/\text{сут}$ ; необходимо сослаться на файл shapefile.shp, находящийся в папке OutputData {C:\...\SedimentData\outputData\shapefile.shp }



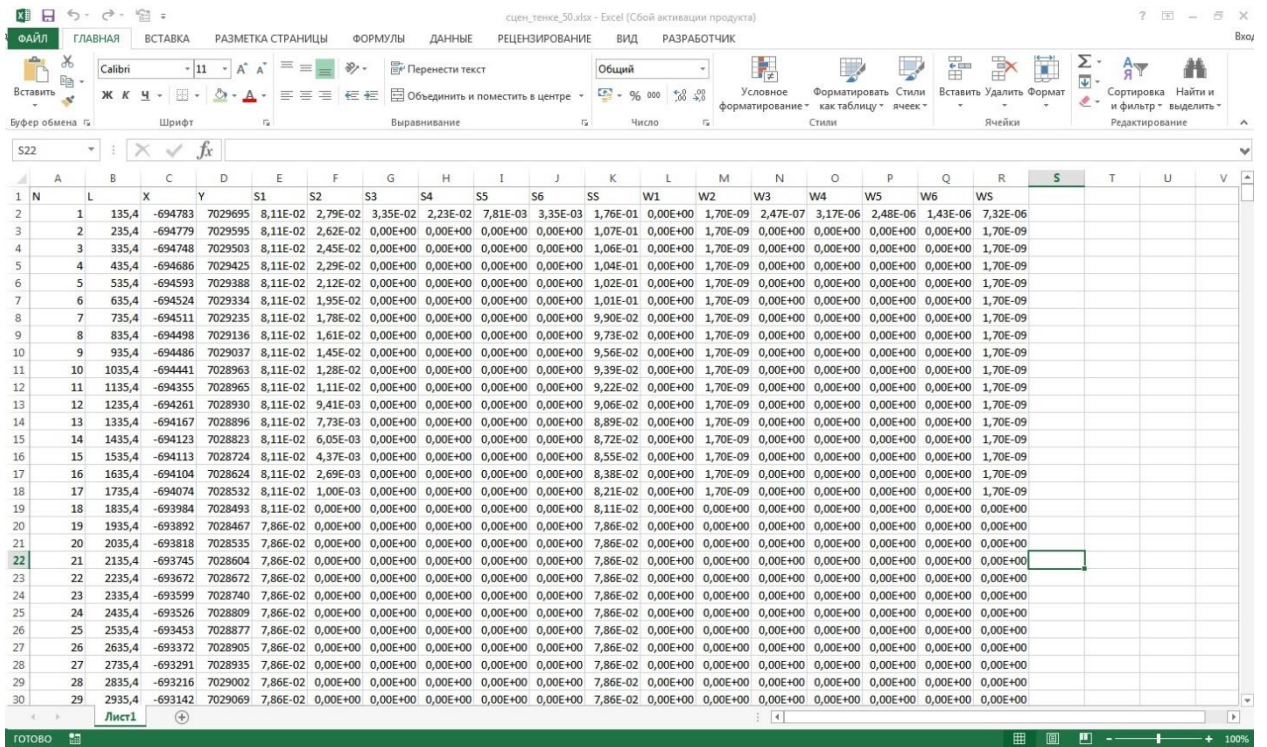


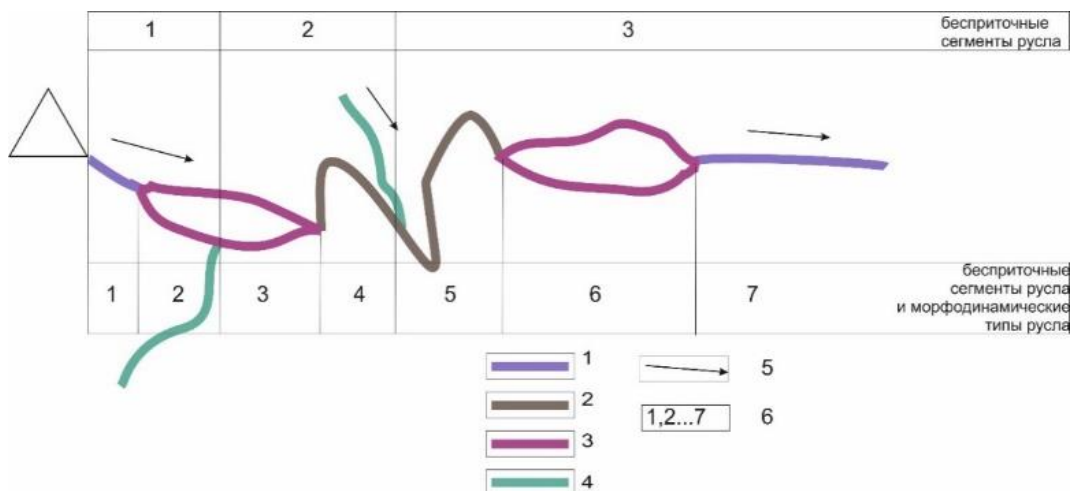
Рисунок 7 — Выходная информация модели

При запуске расчета пользователю не стоит обращать внимания на ошибку всех выходных данных: **WARNING 000725**.

Ввод региональных коэффициентов пересчета ширины русла в глубину (эти значения могут варьировать в диапазоне от 10 до 150) (см. табл. 2 и рис. 8).

Таблица 2 - Рекомендуемые морфодинамические параметры русла

Морфодинамический тип русла (МРТ)	Коэффициент в зависимости
	$h = 1/k(B)$
Прямолинейный	40
Меандрирующий	65
Разветвленный	100



**Рисунок 8** — Сегментация речной сети по морфодинамическому типу русла (МРТ). 1 – прямолинейное, 2 – меандрирующее, 3 – разветвленное; 4 - боковые притоки (4) ниже створа воздействия; 5 - направление течения; 6 – индексы.

Ввод коэффициента Хэлла: 50 – если вещество поступает в поток на фарватере, 200 – с берегов.

Ввод начальной мутности (выше участка воздействия) и пофракционного расхода взвешенных наносов (в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ) (в створе воздействия).

Блок схема представляет собой последовательное описание основных частей модели:

1. Транспорт рассчитывается от створа, для которого наблюдается поступление загрязняющих веществ, для точечных источников загрязнений (сбросы сточных вод), и от замыкающего створа воздействия для диффузионных источников загрязнения (смыв с поверхности водосбора, в том числе разработки полезных ископаемых в долинах рек, русловые карьеры)
2. В качестве исходной информации используется цифровая модель рельефа (ЦМР) (на основе открытых гидрографических ресурсов на базе SRTM - HYDRO1K <https://lta.cr.usgs.gov/HYDRO1K> или HYDROSHEDS <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php>) и вводимые параметры для входного створа (створа загрязнения) и боковых притоков.
3. Расчетная схема применяется к автоматически задаваемой линейной схеме речной сети, автоматически генерируемой на основе ЦМР. Наполнение атрибутов линий осуществляется оператором в интерактивном режиме, при этом обязательно помечаются первый и последний сегмент водотока, между которыми необходимо восстановить изменение концентрации взвешенных частиц. Расходы воды с втекающих водотоков заносятся в атрибуты сегментов основного водотока, идущие сразу после створа в котором происходит слияние. Таким образом, атрибутируются только сегменты основного водотока.
4. Система основана на следующих общих допущениях:
  - отсутствие взаимодействия подземных и русловых вод
  - отсутствие привноса боковыми притоками рассчитываемых загрязнителей
  - отсутствие ниже по течению плотин;
  - отсутствие других техногенных источников воздействия по длине речной сети
  - участок воздействия и створ полного перемешивания расположены на бесприточном участке реки
  - тонкодисперсные илстые частицы ( $d < 0,001$  мм) считаются не осаждаемыми в речном потоке.
  - поток ламинарный, за время  $dt$  частица переносится по течению со скоростью  $U_x = U_x(z)$  на расстояние  $dx = U_x dt$  и оседает под действием силы тяжести  $dz = - w dt$
  - осаждение частиц происходит равномерно на всем длине от участка воздействия
5. Расчет ведется для суточных объемов поступления частиц в реку

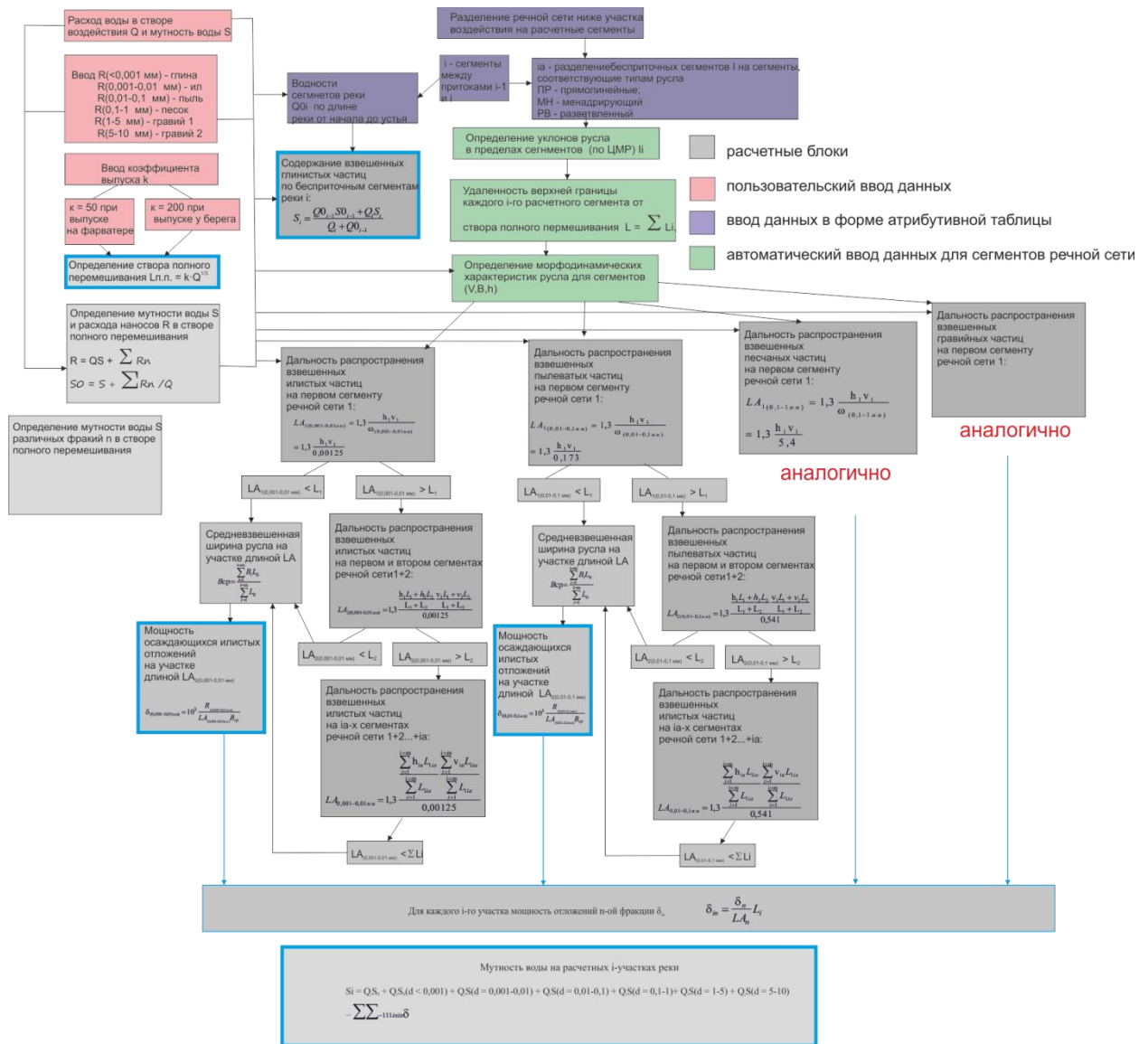


Рисунок 9 — Блок-схема программного обеспечения моделирования шлейфа мутности для исчисления размера вреда водным биоресурсам

### Результаты расчетов

Результат моделирования представляются в виде точек, расставленных с заданным шагом вдоль линии водотока, в каждой из которых известна концентрация по всем градациям частиц. На основе полученных точек в целях визуализации восстанавливается набор растровых линий, в пикселах которых представлены те же концентрации. Результаты могут быть экспортированы в табличный и текстовый вид для их последующего анализа в специализированных (в том числе статистических) программных средствах

## Примеры применения модели «SedimentLoad»

В настоящем разделе приведены примеры использования модели «SedimentLoad» для расчетов распространения взвешенных веществ и донных отложений и расчет гидрологических параметров, необходимых для исчисления размера вреда тихоокеанским лососям и гольцам (*Salvelinus*) при хозяйственной деятельности в руслах рек Дальнего Востока.

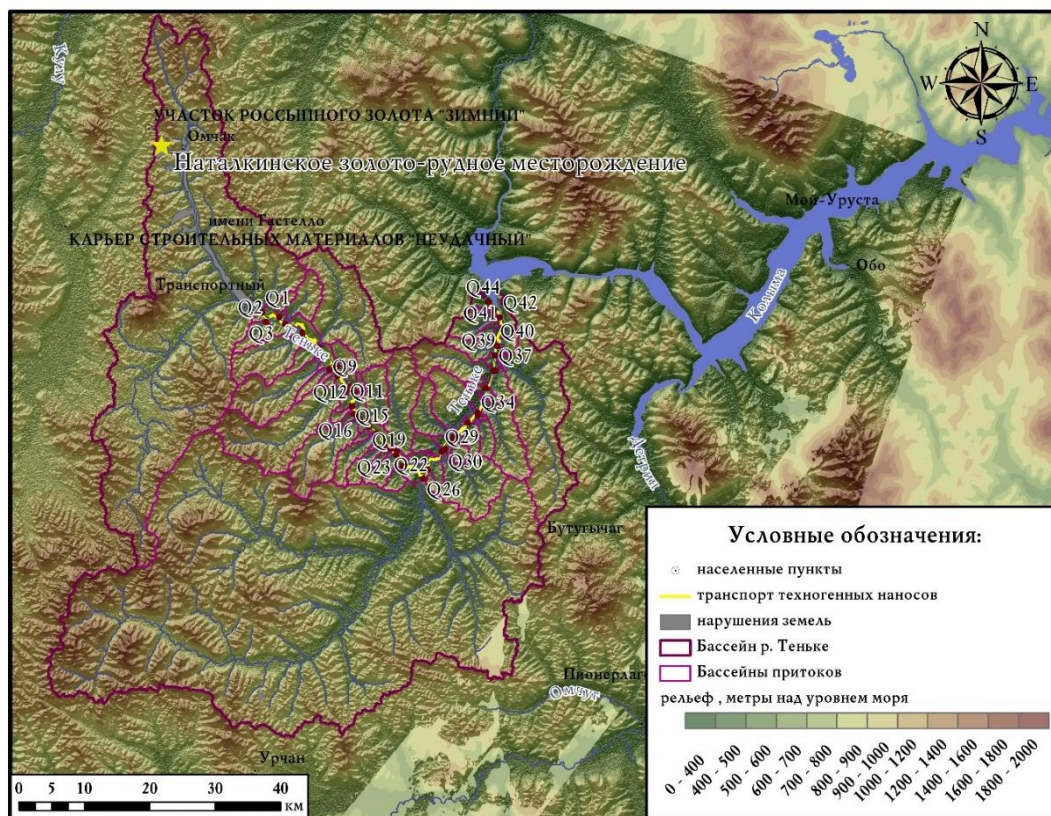
Для задач адаптации модели разработана серия сценарных расчетов изменения стока взвешенных наносов в условиях интенсификации техногенной нагрузки на водосбор, характеризующейся расширением площади антропогенно-преобразованных участков от  $F_I$  до  $F_{III}$  (км<sup>2</sup>), где I, II и III – это варианты антропогенного воздействия (Табл. 3) в пределах территорий исследований – бассейнах рек, нарушенных горнодобывающей деятельностью. Значение  $F_I$  представляет собой фактическую площадь нарушений, определенную в результате дешифрирования космических снимков Landsat, сделанных одноименным спутником в августе 2014 г., остальные площади ( $F_{II}$  и  $F_{III}$ ) характеризуют её предполагаемое увеличение на 50% и 100%.

**Таблица 3** — Сценарии (I,II,III) поступления техногенных наносов в модельные речные системы

река	площадь бассейна, км <sup>2</sup>	длина модельного участка речной, км	Площадь нарушенных земель, млн. км <sup>2</sup>			процент площади нарушенных земель, %			Объем техногенного стока наносов, $W_{slope}$ (тонн/год)			$R, R_{slope}$ (кг/с)		
			I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Теньке	19594	84	2,07	3,11	4,14	0,01	0,02	0,02	1044	1072	1091	0,03	0,03	0,0346
Вывенка	53377	136	19	28,5	38	0,04	0,05	0,07	1196	1224	1244	3,79	3,88	3,94
Мая	628417	579	123	184	246	0,02	0,03	0,04	1325	1353	1373	4,20	6,30	8,20

**Пример 1. Расчет распространения шлейфа мутности от открытых карьеров разработки полезных ископаемых по р. Интриган и р. Омчак (бассейн р. Теньке)**

Наталкинское месторождение, расположенное в Тенькинском районе Магаданской области на водосборной территории бассейнов рек Омчак и Интриган, было открыто в 1944 г. Оценка распространения шлейфа мутности проводится вдоль реки Теньке в условиях природной (фоновой) мутности вод равной 64,4 мг/л. Замыкающий створ смоделированного потока находится области слияния рек Теньке и Колымы (рис. 10). Расходы взвешенных наносов, поступающие в реку на участке воздействия разработок Наталкинского золоторудного месторождения, соответствуют 0,0331; 0,0340 и 0,346 кг/с (табл. 4).



**Рисунок 10** — Карта-схема модельного бассейна Теньке (красными точками показаны границы бесприточных участков;  $Q_n$  – характерное значение водности потока в створе участка под номером n)

**Таблица 4** — Сценарии моделирования транспорта техногенных наносов ниже разработок Наталкинского месторождения прииска (фоновая мутность - 0,0644 кг/м<sup>3</sup>)

Фракции		глина (<0,001)	ил (0,001-0,01)	пыль (0,01-0,1)	песок (0,1-1)	мелкий гравий (1-5)	крупный гравий (5-10)
Содержание фракции в сценарной пробе, %		15	25	30	20	7	3
Сценарий I	0,0331	Доля расхода фракции (кг/с)	0,00496	0,00827	0,00992	0,00661	0,00231
Сценарий II	0,0340		0,00509	0,00849	0,01019	0,00679	0,00238
Сценарий III	0,0346		0,00519	0,00865	0,01038	0,00692	0,00242
Содержание фракции в пробе технических вод, %		8,57	14,54	72,26	4,63	-	-
Сценарий I	0,0331	0,00283	0,00481	0,0239	0,00153	-	-

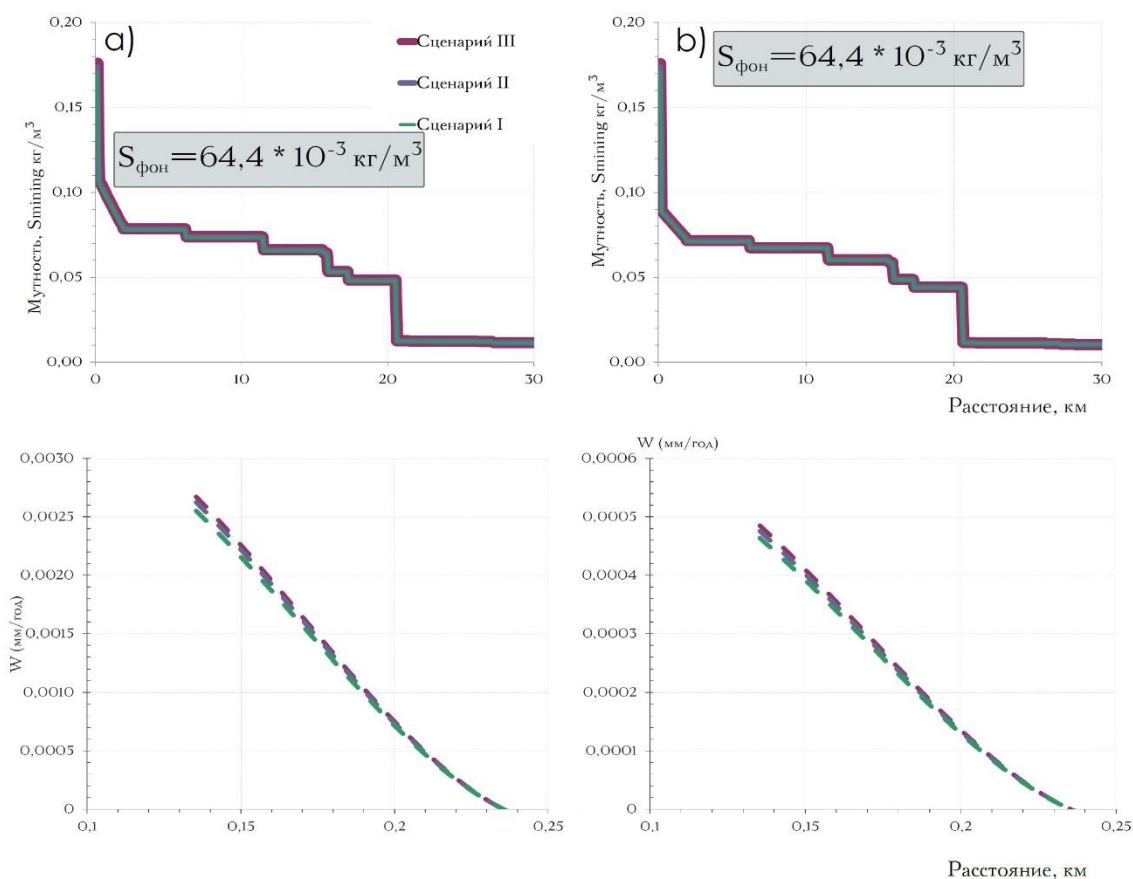


Сценарий II	0,0340	Доля расхода фракции (кг/с)	0,00291	0,00494	0,0245	0,00157	-	-
Сценарий III	0,0346		0,00296	0,00503	0,0250	0,00160	-	-

Результаты сценарных оценок демонстрируют продольное изменение мутности вод в диапазоне от 0,000664 до 0,176 кг/м<sup>3</sup> (при Q<sub>0</sub>) и от 0,00304 до 0,176 (при Q<sub>мин</sub>) кг/м<sup>3</sup> (Таблица 5). Створ полного перемешивания находится на расстоянии 135,4 от участка воздействия разработок Наталкинского месторождения. Техногенный сток в замыкающем створе реки формируется за счет неосаждаемых глинистых частиц. Их минимальная концентрация в нижнем течении Теньке эквивалента минимальной мутности потока на этом участке, т. е. она изменяется от 0,00304 до 0,00334 кг/м<sup>3</sup>. Осаждение минеральной взвеси наблюдается на расстоянии 0,23 км от створа воздействия с максимальной скоростью равной 0,000485 мм/год в условиях пониженной водоносности (Рис. 11).

**Таблица 5** — Максимальные и минимальные значения мутности вдоль смоделированной речной сети реки Теньке

проба	водность	концентрация i-ой фракции, кг/м <sup>3</sup>	глина	ил	пыль	песок	крупный гравий	мелкий гравий	мутность
Сценарная	Q <sub>0</sub>	S <sub>i mining, макс</sub>	0,0811	0,0279	0,0335	0,0223	0,00781	0,00335	0,176
		S <sub>i mining, мин</sub>	0,000729	0	0	0	0	0	0,000729
	Q <sub>мал</sub>	S <sub>i mining, макс</sub>	0,0811	0,0279	0,0335	0,0223	0,00781	0,00335	0,176
		S <sub>i mining, мин</sub>	0,00334	0	0	0	0	0	0,00334
Технических вод	Q <sub>0</sub>	S <sub>i mining, макс</sub>	0,0739	0,0162	0,0806	0,00516	-	-	0,176
		S <sub>i mining, мин</sub>	0,000664	0	0	0	-	-	0,000664
	Q <sub>мал</sub>	S <sub>i mining, макс</sub>	0,0739	0,0162	0,0806	0,0052	-	-	0,176
		S <sub>i mining, мин</sub>	0,00304	0	0	0	-	-	0,00304



**Рисунок 11** — Продольное изменение мутности и наилообразования вдоль смоделированного участка реки Теньке в условиях малой водности потока

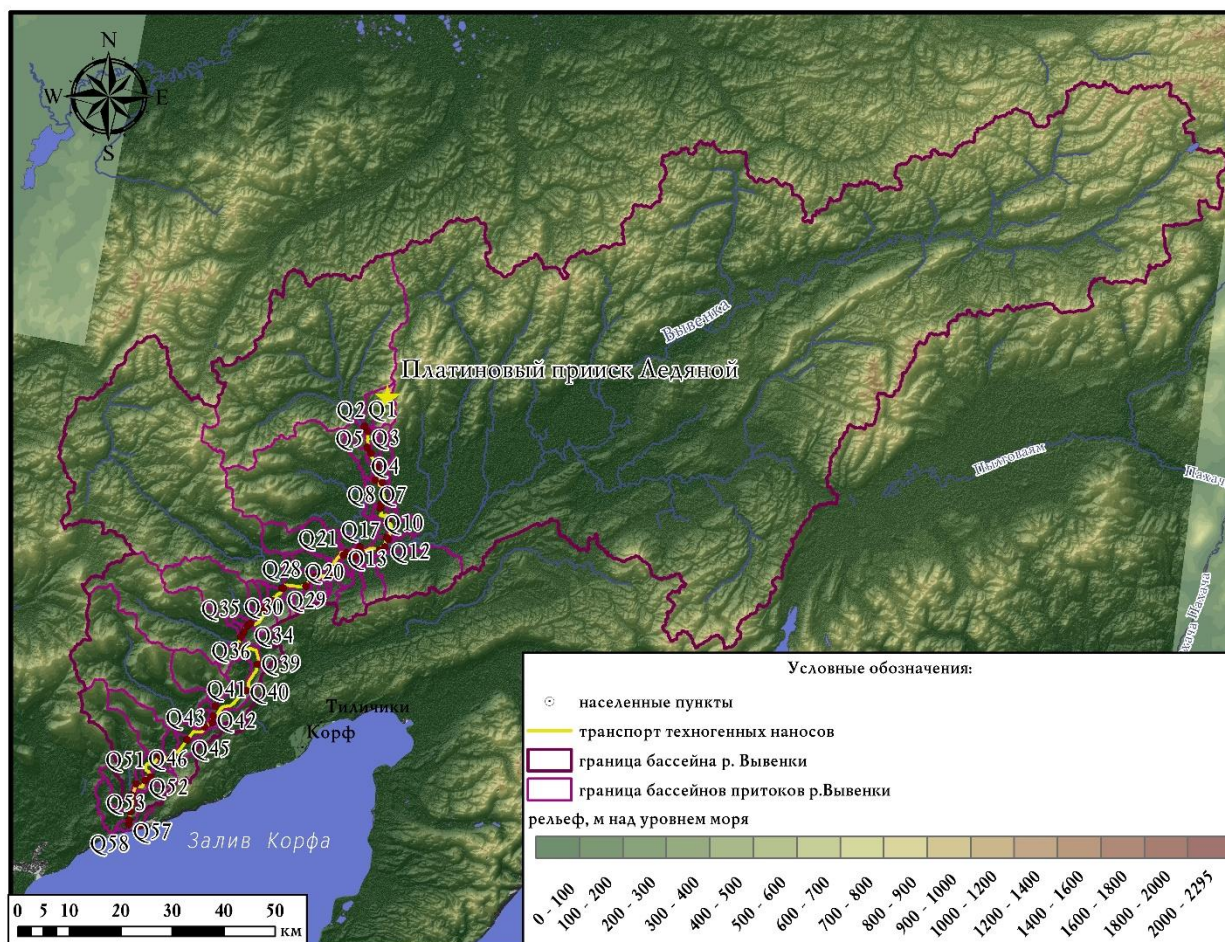
В рамках сценарных расчетов первой модели илистые фракции перемещаемых в составе взвешенных наносов аккумулируются на расстоянии 1,74 км (при  $Q_0$  и  $Q_{\text{мал}}$ ) от створа, замыкающего Наталкинское месторождение, пылеватые и прочие минеральные частицы переносятся на 0,14 км (при  $Q_{\text{мал}}$  и  $Q_0$ , соответственно). Техногенный сток в замыкающем створе реки сформирован глинистыми фракциями транспортируемого материала (Табл. 6).

**Таблица 6** — Дальность распространения техногенных наносов от створа воздействия разработок Наталкинского месторождения вдоль смоделированной речной сети Теньке (Модель I)

проба	водность	дальность распространения i-ой фракции, км от створа воздействия						
		глина	ил	пыль	песок	крупный гравий	мелкий гравий	общая мутность
Сценарная	$Q_0$	83,4	1,74	0,14	0,14	0,14	0,14	83,44
	$Q_{\text{мал}}$	83,4	1,74	0,14	0,14	0,14	0,14	83,44
Технических вод	$Q_0$	83,4	1,74	0,14	0,14	-	-	83,44
	$Q_{\text{мал}}$	83,4	1,74	0,14	0,14	-	-	83,44

**Пример 2. Расчет транспорта шлейфа мутности и осаднения взвеси ниже разработок россыпной платины Сейнав-Гальмознанского горного узла (бассейн р. Вывенки)**

Моделирование перемещения шлейфа мутности с территории разработок россыпной платины Сейнав-Гальмознанского горного узла проводилось вдоль русловой сети бассейна р. Вывенка, состоящей из руч. Сентябрь, впадающего в р. Ветвей на расстоянии 28 км от её устья, и нижнего течения Вывенки в условиях фоновой (природной) мутности вод равной  $3,86 \text{ кг/м}^3$  (Рис. 12).



**Рисунок 12** — Карта-схема модельного бассейна Вывенки (красными точками показаны границы бесприточных участков;  $Q_n$  – характерное значение водности потока в створе участка под номером n)

Общий участок транзита взвеси замыкается в устьевой области реки (залив Корфа). (Рис. 12). На участке воздействия разработок расположена целая система из карьеров технического водоснабжения, которые в период повышенной водности потока способны перехватывать сток руч. Ледяной, руч. Осень и руч. Сентябрь. Отработанная вода может поступать либо в систему отстойников, либо непосредственно в ручей Сентябрь, для которого характерно эпизодическое поступление вод в р. Ветвей (в период прохождения паводков или повышенного сброса отработанных вод). Сценарный расход взвешенных наносов, поступающий в створе воздействия разработок, оценивается в  $0,0203$ ;  $0,0238$  и  $0,0243 \text{ кг/с}$  (Табл. 7). Его пофракционное представление согласовано с гранулометрическим составом технических вод, определенном по результатам отбора проб воды в одном из илоотстойников, расположенных на территории разрабатываемого участка Ледяной, и условной (сценарной) пробы.

**Таблица 7** — Сценарии моделирования транспорта техногенных наносов ниже платинового прииска Ледяной (фоновая мутность - 0,00386 кг/м<sup>3</sup>)

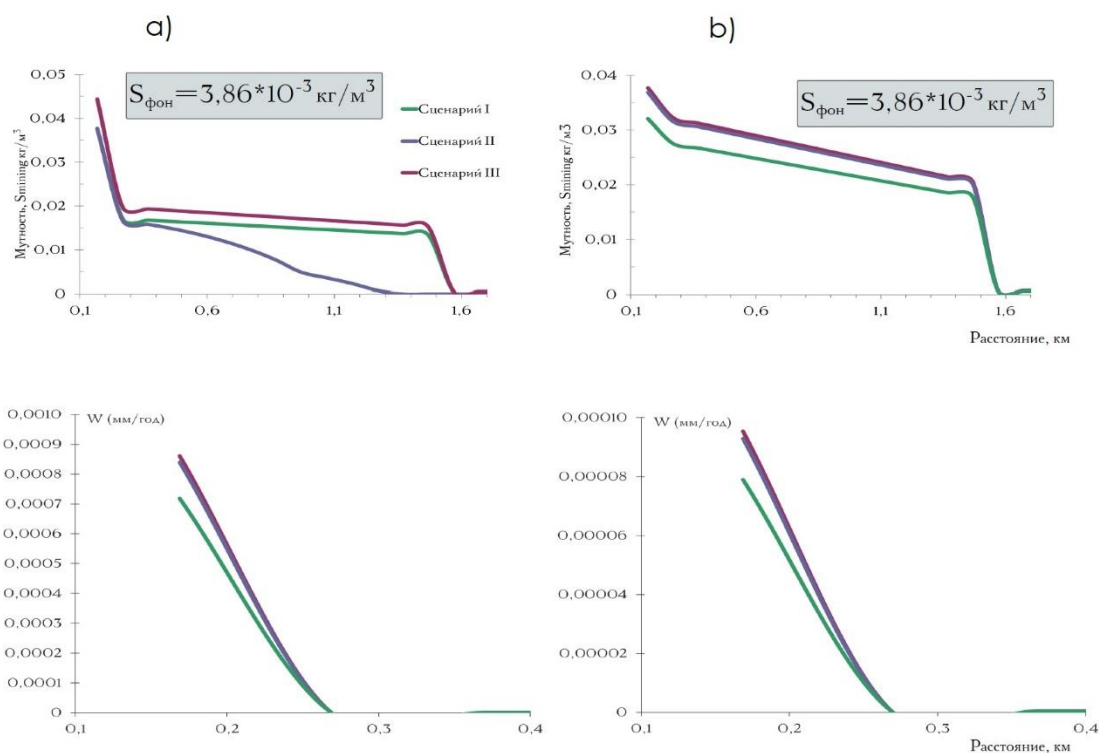
фракции наносов			глина (<0,001)	ил (0,001-0,01)	пыль (0,01-0,1)	песок (0,1-1)	мелкий гравий (1-5)	крупный гравий (5-10)
содержание фракции в пробе технических вод, %			5,97	66,46	6,19	4,75	0	0
Сценарий №	F <sub>нар</sub> , км <sup>2</sup>	R, кг/с	доля расхода фракции (кг/с)					
I	19	0,0203	0,00121	0,01349	0,00126	0,00096	0	0
II	29	0,0238	0,00142	0,01579	0,00147	0,00113	0	0
III	38	0,0243	0,00145	0,01618	0,00151	0,00116	0	0
содержание фракции в сценарной пробе, %			15	25	30	20	7	3
Сценарий №	F <sub>нар</sub> , км <sup>2</sup>	R, кг/с	доля расхода фракции (кг/с)					
I*	19	0,0203	0,00305	0,00508	0,00609	0,00406	0,00142	0,00061
II*	29	0,0238	0,00356	0,00594	0,00713	0,00475	0,00166	0,00071
III*	38	0,0243	0,00365	0,00609	0,0073	0,00487	0,0017	0,00073

Ниже по течению р. Ветвей впадает в Вывенку, ставшую равнинной рекой несколько выше устья крупного притока – реки Тылговая (191 км от устья, при общей длине 395 км). Её основным морфодинамическим типом является свободное меандрирование, на участках которого образуются различные формы излучин (сегментные, блуждающие, прорванные), гораздо меньше распространены прямолинейные и разветвленные русла. По снимку Landsat в зоне слияния дешифрируется повышенное содержание взвешенных наносов в водах Ветвея, формирующее характерный шлейф мутности вод, протянувшийся вниз по течению Вывенки (**Рис. 13**). Отсутствие сопоставимой с деятельностью горных работ антропогенной нагрузки в пределах речного водосбора обуславливает темный фототон пикселей в узлах слияния Вывенки и её боковых притоков, протекающих по территории природного (ненарушенного) ландшафта (**Рис. 13**). На космических снимках наиболее прозрачные (чистые) водные объекты (например, большие пресные озера) окрашены в черный цвет, соответственно, наличие повышенной взвеси в водном потоке осветляет его пиксели.



**Рисунок 13** — Зоны слияния Вывенки и её притоков, шлейф мутности в устьевой области реки

По результатам сценарных расчетов максимальное значение мутности вод на участке моделирования варьирует в диапазоне от 0,0377 до 0,0444 кг/м<sup>3</sup> ( $Q_0$ ) и от 0,0445 до 0,525 ( $Q_{\text{мин}}$ ), минимум концентрации соответствует 0,00002 – 0,00003 кг/м<sup>3</sup>. Створ полного перемешивания находится на расстоянии 158,7 и 168,7 м от участка воздействия разработок россыпной платины в условиях малой и, соответственно, средней водности потока (рис. 14). Основная масса транспортируемой взвеси, сформированная илистыми, пылеватыми и песчаными частицами грунта, аккумулируется в пределах этого участка первого расчетного сегмента речной сети со скоростью около 0,00017 мм/год. Техногенный сток наносов Вывенки, поступающий в залив Корфа, определен содержанием в толще потока минеральных частиц наименьшей геометрической крупности (илы и глины) (Табл. 8-9).



**Рисунок 14** — Продольное изменение мутности и наилообразования вдоль смоделированного участка реки Ветвей в условиях средней водности потока

**Таблица 8** - Максимальные и минимальные значения мутности вдоль смоделированной речной сети Вывенки

проба	водность	концентрация i-ой фракции, кг/м <sup>3</sup>	глина	ил	пыль	песок	крупный гравий	мелкий гравий	мутность
Сценарная	Q <sub>0</sub>	S <sub>i mining</sub> , макс	0,0099	0,0102	0,0122	0,0081	0,0028	0,0012	0,0444
		S <sub>i mining</sub> , мин	0,0000277	0,00000032	0	0	0	0	0,0000280
	Q <sub>мал</sub>	S <sub>i mining</sub> , макс	0,01116	0,01218	0,01460	0,00974	0,00340	0,00146	0,05254
		S <sub>i mining</sub> , мин	0,000033	0	0	0	0	0	0,000033
Технических вод	Q <sub>0</sub>	S <sub>i mining</sub> , макс	0,0063	0,0270	0,0025	0,0019	-	-	0,0377
		S <sub>i mining</sub> , мин	0,0000175	0,0000009	0	0	-	-	0,000018
	Q <sub>мал</sub>	S <sub>i mining</sub> , макс	0,00676	0,03236	0,00302	0,00232	-	-	0,04446
		S <sub>i mining</sub> , мин	0,0000195	0	0	0	-	-	0,0000222

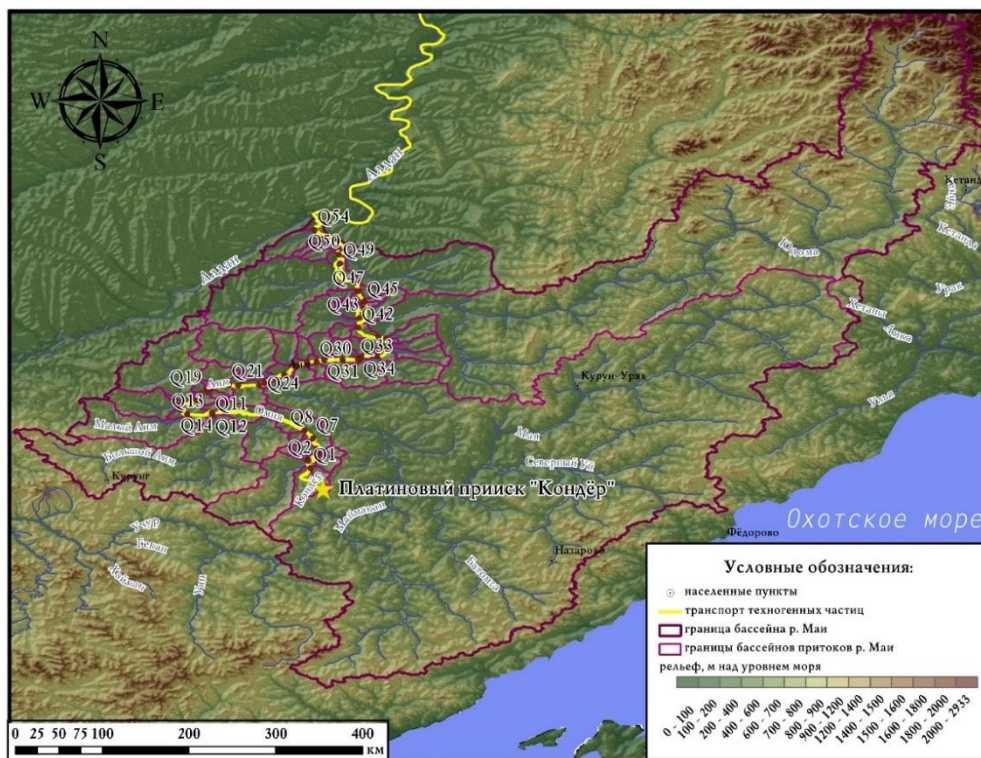
**Таблица 9** — Дальность распространения техногенных наносов от створа воздействия разработок Замаара вдоль смоделированной речной сети Вывенки (Модель I)

проба	водность	дальность распространения i-ой фракции, км от створа воздействия						
		глина	ил	пыль	песок	крупный гравий	мелкий гравий	общая мутность
Сценарная	Q <sub>0</sub>	132,47	132,5	0,169	0,169	0,169	0,169	132,5
	Q <sub>мал</sub>	132,46	132,5	0,159	0,159	0,159	0,159	132,5

Технических вод	$Q_0$	132,47	132,47	0,17	0,17	-	-	132,47
	$Q_{\text{мал}}$	132,46	132,46	0,16	0,16	-	-	132,46

**Пример 3. Расчет транспорта техногенных наносов ниже разработок россыпной платины Кондерского месторождения (бассейн р. Мая)**

Смоделированный участок речной сети включает руч. Кондер, р. Омня, р. Аим и Маю в её нижнем течении. Оценка техногенного стока наносов проводится в условиях фоновой мутности вод равной 5,2 мг/л. Замыкающий створ транспортирующего потока расположен в области слияния реки Май и Алдан (**Рис.15**).



**Рисунок 15** — Карта-схема модельного бассейна Май (красными точками показаны границы бесприточных участков;  $Q_n$  – характерное значение водности потока в створе участка под номером n)

Сценарный расход техногенных наносов, поступающих в руч. Кондер на участке воздействия разработок одноименного месторождения равен 4,20; 6,30 и 8,20 кг/с (Табл. 10). Ниже по течению его воды, впадая в реку Омня, образуют характерный шлейф мутности, распознаваемый по данным космической съёмки. В отличие от Вывенки, где сток наносов реки Ветвей существенно разбавляется водами главной реки и на определенном этапе сформировавшийся шлейф мутности пропадает со снимков, воды руч. Кондер меняют фототон Омня на всем её протяжении ниже узла слияния (Рис. 16).

**Таблица 10** — Сценарии моделирования транспорта техногенных наносов ниже платинового прииска «Кондёр» (фоновая мутность - 0,0052 кг/м<sup>3</sup>)

Фракции (МАЯ)	глина (<0,001)	ил (0,001-0,01)	пыль (0,01-0,1)	песок (0,1-1)	мелкий гравий (1-5)	крупный гравий (5-10)
Содержание фракции в сценарной пробе, %	20	20	15	15	15	15
Сценарий I	4,20	Доля расхода фракции (кг/с)	0,840	0,840	0,630	0,630
Сценарий II	6,30		1,260	1,260	0,945	0,945
Сценарий III	8,20		1,640	1,640	1,230	1,230



Содержание фракции в пробе технических вод, %			3,9	35,4	58,8	1,9	-	-
Сценарий I	4,20	Доля расхода фракции (кг/с)	0,164	1,486	2,469	0,080	-	-
Сценарий II	6,30		0,246	2,230	3,703	0,120	-	-
Сценарий III	8,20		0,320	2,903	4,822	0,156	-	-



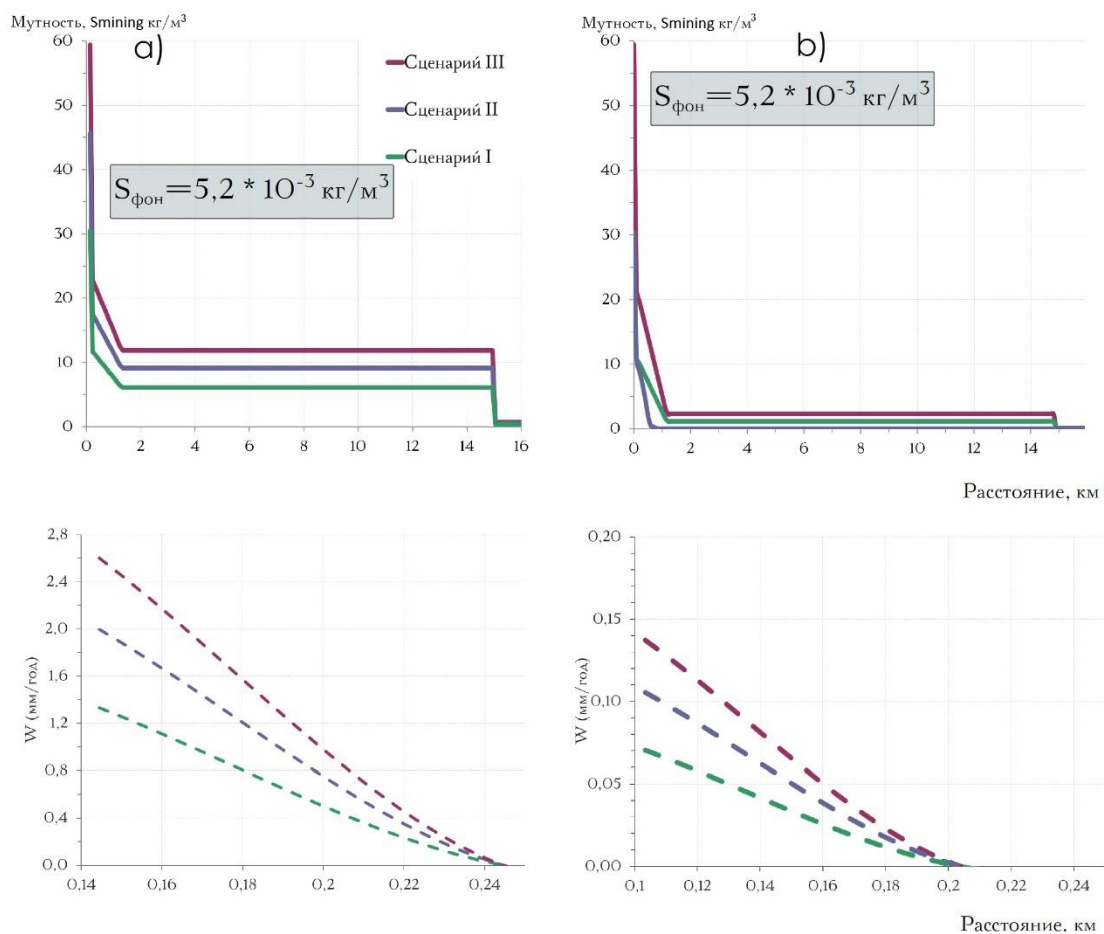
**Рисунок 16** — Образование шлейфа мутности и области слияния, образующиеся вдоль смоделированного потока

Впадение крупного притока (р. Большой Аим) разбавляет мутные воды Омня, что дешифрируется по более темному тону пикселей снимка, а транспортирующий поток ниже узла слияния становится рекой Аим. В области слияния с Маей шлейфа мутности не образуется, однако он просматривается в замыкающем створе реки. Сценарные оценки показали трансформацию мутности вод в диапазоне от 0,000841 до 21,8 кг/м<sup>3</sup> (при Q<sub>0</sub>) и от 0,00229 до 59,4 (при Q<sub>мин</sub>) кг/м<sup>3</sup> (Табл. 11). Створ полного перемешивания находится на расстоянии 103,4 и 144,5 м от участка воздействия разработок Кондерского месторождения в условиях малой и средней водности транспортирующего потока. Литогенный материал, перемещаемый рекой в её нижнем течении, полностью сформирован глинистыми частицами грунта. Наиконакопление интенсифицировано на участке длиной 0,24 км, в пределах которого скорость аккумуляции достигает 2,7 мм/год в маловодную фазу водного режима (Рис. 17).

**Таблица 11** — Максимальные и минимальные значения мутности вдоль смоделированной речной сети р. Май

проба	водность	концентрация i-ой фракции, кг/м <sup>3</sup>	глина	ил	пыль	песок	крупный гравий	мелкий гравий	мутность
Сценарная	Q <sub>0</sub>	S <sub>i mining</sub> , макс	4,36	4,35	3,26	3,26	3,26	3,26	<b>21,8</b>
		S <sub>i mining</sub> , мин	0,00429	0	0	0	0	0	0,00429
	Q <sub>мал</sub>	S <sub>i mining</sub> , макс	11,89	11,9	8,91	8,91	8,91	8,91	<b>59,4</b>
		S <sub>i mining</sub> , мин	0,0117	0	0	0	0	0	0,0117
	Q <sub>0</sub>	S <sub>i mining</sub> , макс	0,85	7,70	12,79	0,41	-	-	<b>21,8</b>

Технических вод	Q <sub>мал</sub>	S <sub>i mining, мин</sub>	0,000841	0	0	0	-	-	0,000841
		S <sub>i mining, макс</sub>	2,32	21,04	34,94	1,13	-	-	<b>59,4</b>
		S <sub>i mining, мин</sub>	0,00229	0	0	0	-	-	0,00229



**Рисунок 17** — Продольное изменение мутности и наилообразования вдоль смоделированного участка реки Мая в условиях малой водности потока

По результатам сценарных расчетов первой модели илстые частицы осаждаются на расстоянии 2,34 – 2,44 км (при Q<sub>0</sub>) и 1,2 (при Q<sub>мал</sub>) от створа воздействия Кондерского месторождения, пылеватые и более крупные фракции наносов переносятся на 0,103 – 0,145 км (при Q<sub>мал</sub> и Q<sub>0</sub>, соответственно), т.е. прекращают свое движение выше створа полного перемешивания (Табл. 12). Согласно основному допущению этого метода техногенный сток в замыкающем створе формирует глинистый материал.

**Таблица 12** — Дальность распространения техногенных наносов от створа воздействия разработок Кондер вдоль смоделированной речной сети Май

проба	водность	дальность распространения i-ой фракции, км от створа воздействия						
		глина	ил	пыль	песок	крупный гравий	мелкий гравий	общая мутность
Сценарная	Q <sub>0</sub>	579,1	2,44	0,145	0,145	0,145	0,145	<b>579,1</b>

	$Q_{\text{мал}}$	579,2	1,20	0,103	0,103	0,103	0,103	<b>579,2</b>
Технических вод	$Q_0$	579,1	2,34	0,145	0,145	-	-	<b>579,1</b>
	$Q_{\text{мал}}$	579,2	1,20	0,103	0,103	-	-	<b>579,2</b>

## Литература

- 1 A geomorphological approach to the management of rivers contaminated by metal mining / M.G., Macklin, P.A. Brewer, K.A. Hudson-Edwards, G. Bird, T.J. Coulthard, I.A. Dennis, P.J. Lechler, J.R. Miller, J.N. Turner // *Geomorphology*. – 2006. V. 79. - P. 423–447.
- 2 Lick W.J. Sediment and contaminant transport in surface waters / W.J. Lick – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 398 p.
- 3 Julien P. Erosion and sedimentation / P. Julien – UK: Cambridge univ. press, 2010. – 371 p.
- 4 Sediment dynamics and pollutant mobility in rivers / Bernhard Westrich, Ulrich Förstner - Berlin: Springer, 2007. – 430 p.
- 5 Malcherek A. Mathematical Modeling of Hydraulic Flow and Transport Processes in Estuaries / A. Malcherek – Germany: University of Hannover, 1995.
- 6 Fischer H.B. The mechanics of dispersion in natural streams / H.B. Fischer // *J. Hydraul. Div ASCE*. - 1967. - V. 93. - P. 187-216.
- 7 Гиргидов А.Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью / А.Д. Гиргидов - СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996. – 259 с.
- 8 Проектная документация «Строительство Багаевского гидроузла на р. Дон». Раздел 12 «Оценка воздействия и определения размера вреда водным биологическим ресурсам». Объекты 2-го этапа (основного периода). 03-16-ок-2-вбр. Т. 12.20.2. Книга 1. АО Акватик. 2017