

**Секция II. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
КАЧЕСТВА ВОД, ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭКОСИСТЕМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ  
СЦЕНАРИЯХ АНТРОПОГЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И  
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

**МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ  
МУТНОСТИ РЕЧНЫХ ВОД И ИХ  
ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ<sup>11</sup>**

Алексеевский Н.И., Промахова Е.В., Романченко А.О., Чалов С.Р.  
МГУ им. М.В.Ломоносова, Географический факультет, г. Москва  
hydroserg@mail.ru

Мониторинг содержания в воде взвешенных минеральных частиц – одна из задач системы наблюдений за изменением гидрологического состояния и режима рек. При решении комплекса научных проблем на конкретных участках рек приходится использовать косвенные методы контроля за содержанием в воде взвешенных частиц. Их применение сталкивается с комплексом ограничений в основном технического характера. Эффективность получения этой информации зависит от наличия калибровочных кривых, связывающих фактические (весовые) значения мутности с оптически или яркостными характеристиками, косвенно характеризующими содержание в воде взвешенных минеральных частиц. В настоящей работе эти проблемы рассмотрены на примере рек Камчатки и бассейна р. Селенги.

При использовании оптических методов калибровочные кривые связывают мутность воды  $S$ , кг/м<sup>3</sup> и оптическую (нефелометрическую) мутность NTU, величина которой зависит от способности воды с находящимися в ней примесями рассеивать световой поток. Чем больше содержание примеси в воде, тем больше эта способность, больше величина NTU и, следовательно, мутность воды. Для изученных нами рек России характерно линейное соответствие между переменными:

---

<sup>11</sup>Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты: №14-05-31351, №15-05-05515).

$$S = \alpha + bNTU, \quad (1)$$

где  $\alpha = 7,27$ ;  $b = 0,82$  – эмпирические параметры.

Для конкретных рек коэффициенты этого уравнения зависят от зональных условий формирования стока воды и наносов, степени антропогенной нагрузки на водосборы, фазы водного режима, гранулометрического состава взвешенных частиц, их генезиса (руслотные, бассейновые) и других факторов. Полученные зависимости  $S = f(NTU)$  отличаются высокой достоверностью, для большинства групп рек коэффициент корреляции превышает 0,90. Исключение составляет совокупность водотоков на склонах вулканов, для которых характерны уникальные условия формирования мутности. Угловым коэффициентом  $b$  в зависимости (1) для разных групп рек нелинейно возрастает при увеличении диаметра взвешенных частиц  $d$ :  $b = 0,65e^{4,79d}$ . Взвешенные частицы одинаковой массы и разного диаметра неоднозначно влияют на оптическую мутность: её величина возрастает при более мелком составе взвеси и уменьшается при более крупном. Свободный член уравнения (1)  $\alpha$  зависит от максимальной мутности воды  $S_{\max}$  и скорости течения  $v$  в соответствии с уравнением множественной регрессии:

$$\alpha = 21,5 - 0,0024S_{\max} - 48,1v. \quad (2)$$

Он также возрастает при увеличении содержания в воде органических веществ. Их наличие в воде пропорционально количеству органического углерода во взвеси  $C_{\text{орг}}$ . Например, для рек в бассейне Селенги зависимость между параметром  $\alpha$  и величиной  $C_{\text{орг}}$  имеет линейный убывающий характер ( $r = 0,86$ ):

$$\alpha = -25,0 \cdot C_{\text{орг}} + 170. \quad (3)$$

Дистанционные методы измерения мутности основаны на способности водных объектов излучать, рассеивать и поглощать электромагнитные волны в зависимости от содержания в воде взвешенных частиц [1]. Разное содержание в воде взвешенных минеральных частиц, органических и биологических субстанций определяет различия в величине отраженного излучения, регистрируемого специальной аппаратурой. Оно влияет на оптические характеристики воды, её яркость и определяется величиной  $DN$ . Ключевую роль при этом играет спектральная плотность энергетической яркости  $L_i$  [2] и коэффициент отражения (спектральной яркости)  $\rho^*$ , поскольку

$$S = \varphi(DN, L_i, \rho^*). \quad (4)$$

Обоснование калибровочных функций типа (4) сводится к обработке цветных синтезированных снимков, оценке яркости пиксе-

лей в каждой спектральной зоне и расчету индексных изображений. Результаты оценки яркости пикселей сопоставляются с мутностью, полученной в натуральных условиях. Получаемые при этом регрессионные зависимости аналитически связывают оптическую мутность и значения коэффициентов спектральной яркости одного спектра [3]. Нередко более эффективны мультиспектральные регрессии [4]. Возможность применения космических методов для оценки мутности речных вод зависит от качества съемочной аппаратуры (разрешения снимков).

Обработка данных по рекам Камчатки показала, что для рек, ширина которых меньше 5 м, могут применяться только снимки высокого разрешения (0,5 м; Worldview). На снимках с меньшим разрешением насыщение воды взвешенными частицами не подлежит идентификации вследствие некачественного изображения водной поверхности. Ограничение размера водотоков по ширине русла для определения мутности по снимку с разрешением 3 м составляет 10 м. Для адаптации данной технологии применительно к условиям бассейна р. Селенги создана база подспутниковых измерений мутности воды и соответствующих космических снимков. Она характеризует условия формирования мутности в период паводка (июль-август) 2011 г. и межени (июнь) 2012 г.

Для периода паводков зависимость между переменными, соответствующими ближней инфракрасной зоне и диапазону мутности от 1,43 до 89,5 г/м<sup>3</sup>, имеет вид ( $r = 0,82$ ):

$$S = 1670\rho^* - 36,5. \quad (5)$$

В летнюю межень зависимость между  $S$  и  $\rho$  сохраняет линейный характер (при несовпадении эмпирических параметров ( $r=0,95$ )):

$$S = 5000 \rho^* - 186. \quad (6)$$

Величина этих параметров зависит от гранулометрического состава взвешенных частиц (в условиях паводка  $d = 0,04$  мм, в межень – 0,08 мм), наличия в воде других примесей (планктон, взвешенные органические вещества, растворённые соли и др.). Их влияние изменяется для разных фаз водного режима, сезонов года, сочетаний факторов, влияющих на процессы смыва почв и разрушения горных пород. Средняя абсолютная погрешность расчётов по уравнению (5) составляет 6 г/м<sup>3</sup>, а относительная – 10%. Погрешности использования уравнения (6) соответственно равны 23 г/м<sup>3</sup> и 29%. Наиболее приемлемые результаты метод обеспечивает в диапазоне изменения

мутности от 0 до 500 г/м<sup>3</sup>. При большем содержании в воде взвешенных частиц точность метода понижается. Максимальные проблемы его применения возникают при наличии в воде других (не минеральных) примесей.

Методы прямых и косвенных измерений мутности использованы для изучения особенностей трансформации мутности на участках мощного инженерного преобразования поверхности отложений в долинах и руслах рек при разработке месторождений россыпных месторождений благородных металлов, на участках организации переходов через реки транспортной инфраструктуры. Основное внимание уделено последствиям проведения горных работ на реках Камчатки и в бассейне р. Селенги. На таких участках сток взвешенных наносов  $W_R$  в пределах открытых разработок связан с поступлением минеральных частиц с естественных и нарушенных участков земной поверхности. К количеству минеральных частиц в речной воде на верхней границе участка, формирующихся в природных условиях, добавляется поступление взвешенных наносов при эрозии руслоотводов, склоновой эрозии с отвалов, просачиванием вод со взвесью из технологических водоёмов и сбросом отработанных сточных вод. Уменьшение мутности при этом соответствует объему аккумуляции минеральных частиц.

Пространственная изменчивость содержания в воде взвешенных частиц для участков месторождения зависит от интенсивности техногенного воздействия. В зависимости от режима работы драг, сброса воды в бессточные карьеры, илоотстойники или непосредственно в водотоки мутность на выходе с разработок может в разной степени отличаться от фоновых значений. Для изученных рек степень изменения фоновой мутности под влиянием этих факторов изменялась в диапазоне от 1,6 до 600 раз. По мере уменьшения хозяйственной нагрузки сокращается и количество взвешенных частиц, поступающих в реки. На временной ход мутности воды в ручьях влияет не только выпадение атмосферных осадков, но и процессы водозабора на технологические нужды, фильтрация в стенки руслоотвода, изменение рельефа территории в связи с добычей металла и сброс сточных вод.

Максимальное воздействие горных работ на мутность речных вод в бассейне Селенги, характерно для нижнего течения р. Туул (Монголия) в районе Заамарского месторождения. В период прохождения летних паводков 2011 г. ниже разработок наблюдалось уве-

личение мутности почти в три раза (от 107 до 289 г/м<sup>3</sup>). Ниже по течению содержание взвешенных частиц к устью Туула снижается в связи с их аккумуляцией в 1,6 раза (до 184 г/м<sup>3</sup>). В летнюю межень содержание взвешенных частиц возрастает на участке поступления сточных вод в 1,6 раза (с 84,8 до 136 г/м<sup>3</sup>), а к устью уменьшается в 1,8 раза (до 77,1 г/м<sup>3</sup>). Аналогичные процессы характерны и для малой р. Бороо, на участке которой мутность воды в межень ниже месторождения золота увеличивается в 1,6 раза (с 39,2 до 64,2 г/м<sup>3</sup>), а при прохождении летних паводков – в 8,8 раза (с 24,3 до 212 г/м<sup>3</sup>).

Содержание взвешенных частиц может увеличиваться в результате сброса сточных вод с площадок проведения горных работ в 20 раз. Изменение мутности по длине водотоков ниже участков проведения горных работ зависит от соотношения составляющих баланса взвешенных наносов. В целом она уменьшается по мере удаления от зоны расположения техногенного источника наносов. Наличие в сточных водах горнодобывающего предприятия тонкодисперсных фракций часто обуславливает слабое уменьшение мутности воды по длине малых водотоков. После их впадения в более крупные реки уменьшение мутности воды происходит в основном в результате процессов разбавления. Уменьшение мутности воды ниже антропогенного источника минеральных частиц происходит за счет разбавления и аккумуляции наиболее крупных фракций взвеси; такая закономерность характерна и для участков сооружения транспортных переходов через реки. Их главное отличие – в относительной кратковременности влияния на изменение фоновой мутности и экспоненциальное убывание начальной мутности по мере удаления от створа перехода трубопровода, мостового перехода и т.п.

Трансформация мутности – один из основных абиотических факторов сукцессионного развития сообществ гидробионтов и, в частности, ихтиофауны. В зависимости от масштабов и продолжительности повышенного поступления в реки минеральных частиц возникает негативный эффект трансформации состояния рыб: частицы взвеси истирают покровы рыб, прежде всего, жаберный эпителий, снижают резистентность организма к инфекциям и вызывают токсикоз от растворенных металлов и ядовитых примесей. Пребывание в загрязненной среде сказывается на большинстве гематологических показателей рыб, так как стресс приводит к отклонению их состояния от равновесного биохимического состояния организма. Воздействие минеральных частиц на рыб состоит в поврежде-

нии жаберного эпителия, а в конечном итоге – к нарушению метаболизма и гибели. Травмы жабр у мальков нерки, например, вызывает содержание в воде взвешенных частиц уже в количестве 3,2 мг/л [5]. Их концентрация 40 мг/л сопровождается увеличением плавательной активности, частоты дыхательных движений, а затем снижением подвижности и угнетением дыхания. Увеличение мутности до 240 мг/л приводит к восьмикратному увеличению спазматических движений жабр, а при 500 мг/л начинаются патологические изменения в составе крови и нарушения осморегуляции.

При оценке воздействия мутности на состояние гидробионтов предполагается, что при ее антропогенном увеличении содержание взвешенных веществ не должно превышать природный фон более чем на 0,25 мг/л для рыбохозяйственных водотоков высшей и первой категории, а для водотоков, содержащих в межень природной взвеси более 30 мг/л, допускается увеличение мутности на 5% и меньше [6]. Лососи предпочитают чистые прозрачные реки с минимальным количеством взвешенных частиц [7]. Пороговые концентрации взвеси, соответствующие уменьшению численности лососей, равны 100-300 мг/л [8]. Для лососей опасно продолжительное пребывание в воде с мутностью более 25-35 мг/л. Снижение численности хариуса и сига в 4-20 раз в сибирских реках происходит при повышении природного фона мутности до 40-60 мг/л [9]. В водотоках района разработок россыпной платины в Корякии максимальные значения мутности с 2004 г. фиксировались в руч. Ольховый и превышали 100 мг/л, а в 2008-2011 гг. постоянно составляли не менее 2000-3000 мг/л. Уже в первый год после возникновения повышенного содержания минеральных частиц в воде в ручье не осталось рыбы. По мере увеличения мутности воды происходило снижение численности захода лососей в ручей и другие реки, постепенно исчезла их молодь. К 2011 г. в р. Левтыринываям (при мутности 40-50 мг/л) отмечалось присутствие единичных экземпляров лососевых рыб; в данном случае опасные для экосистем лососевых рек значения мутности воды соответствуют содержанию в воде минеральных частиц больше 25-35 мг/л.

### Литература

1. *Вельтищев Н.Ф., Семенченко Б.А.* Дистанционные методы измерений в гидрометеорологии: учебное пособие. –М.: Издательство Московского университета, 2005. 129 с.

2. *Лабутина И.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков: Учебное пособие для студентов вузов. –М.: Аспект Пресс Москва, 2004. –184 с.
3. *Stumpf R.P., Arnone R.A., Gould R.W., Martinolich P.M., Ransibrahmanakul V.* A partially coupled ocean–atmosphere model for retrieval of water-leaving radiance from SeaWiFS in coastal waters / Eds.: S. B. Hooker, & E. R. Firestone. SeaWiFS Postlaunch Tech. Rep. Ser. 22: NASA Goddard Space Flight Cent, 2003. – P. 51–59.
4. *Koponen S., Ruiz-Verdu A., Heege T., Heblinski J., Sorensen K., Kallio K., Pyhalahti T., Doerffer R., Brockmann C., Peters M.* Development of MERIS lake water algorithms. ESAValidation Report, 2008. 65 p.
5. Опасные русловые процессы и среда обитания лососевых рыб на Камчатке/ Под ред. С.Р.Чалова, В.Н. Лебедева, А.С. Чаловой. – М.: Изд-воВНИРО, 2014. – 240 с.
6. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. – М.: Изд-воВНИРО, 2011. – 257 с.
7. *Леванидов В.Я.* Экосистемы лососевых рек Дальнего Востока // Беспозвоночные животные в экосистемах лососевых рек Дальнего Востока. –Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1981.–С. 3–21.
8. *Herbert D.W.M., Richards J.M.* The growth and survival of fish in some suspensions of solids of industrial origin // Int. J. Air Wat. Poll, 1963. –V. 7. –P. 297–302.
9. *Зюсько А.Я., Русанов В.В.* Состояние популяций хариуса в районах проведения горных работ// В кн.: Экологическая обусловленность фенотипа рыб и структура их популяции/ под ред. Добринской Л.А. 1989.–М.: АН СССР. С. 125–128.