

---

---

## ИЗМЕРЕНИЕ МУТНОСТИ ПОТОКА СОВРЕМЕННЫМИ СПОСОБАМИ И ЕЕ КОРРЕЛЯЦИЯ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЕДИНИЦЕ ОБЪЕМА НА ПРИМЕРЕ ВОДОХРАНИЛИЩА ДЕЗ (ИРАН)

**В.И. Елфимов, Хасад Хамид**

Кафедра гидравлики и гидротехнических сооружений  
Российский университет дружбы народов  
*ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198*

Рассматриваются вопросы измерения мутности потока жидкости с помощью анализатора взвешенных частиц, использующего фотометрический принцип, определяющий поглощение света и его рассеивание в слое анализируемого вещества при условии, что источник света и детектор находятся на одной оси или под углом  $90^\circ$  (нефелометр). Однако для определения скорости заиления водохранилища необходимо знать вес взвешенных частиц в единице объема (концентрацию). На основе исследований, проводимых на водохранилище Дез, были получены корреляционные связи между измерениями, полученными с помощью нефелометра, и концентрацией взвешенных частиц (TSS).

**Ключевые слова:** мутность потока, концентрация взвешенных частиц, мутномер, заиление водохранилища.

В современной аналитической практике величина мутности является достаточно важным интегральным показателем и наиболее широкое применение находит в водоподготовке, водоочистке в пищевой и химической промышленности. Развитие этого метода анализа происходило параллельно по многим направлениям, что объясняется как разносторонней природой самого явления, так и большим разнообразием национальных и отраслевых стандартов, которые зачастую являются узкоспециализированными и ориентированными на конкретную технологию. Это привело к появлению очень большого количества различных единиц измерения мутности, и сейчас основная проблема при выборе необходимого анализатора мутности заключается в понимании того, отвечает ли его конструкция и используемая шкала измерения поставленной аналитической задаче.

В зарубежной и в отечественной практике наиболее часто используется термин «турбидиметр», т.е. анализатор мутности или анализатор взвешенных частиц, использующий фотометрический принцип и определяющий поглощение света в слое анализируемого вещества при условии, что источник излучения и детектор расположены на одной оси. В нефелометрах для определения мутности используется принцип светорассеивания, определяемого под углом  $90^\circ$  к источнику. Поскольку в конструкции большинства современных приборов применяются детекторы как на проходящее, так и на рассеянное под различными углами к источнику излучение и производители свободно используют все три термина, договорились для наименования анализаторов мутности использовать одно название «мутномер».

**Стандарты мутности на основе фармазина.** Фармазин является тем веществом, которое при разбавлении его водой хорошо с ней перемешивается, образуя суспензию, и долго находится в этом состоянии, не выпадая в осадок. Уникальные свойства фармазиновой суспензии, в первую очередь воспроизводимость и возможность длительного хранения, обеспечили ее широкое использование в качестве первичного стандарта для калибровки мутномеров. Обобщенное название единиц мутности на основе фармазина — FNU (или ЕМФ — единицы мутности по фармазину), которая фактически соответствует концентрации фармазиновой суспензии, выраженной в мг/л. Для второй группы единиц мутности, где единицы выражают концентрацию конкретных веществ (каолина, кремнезема) или другого стандарта, характерного для данного типа производства или обеспечивающего наилучшую корреляцию с измерением концентрации в мг/л. Для данных единиц, кроме используемых стандартов, не регламентируется ни тип источника, ни способ детектирования, и поэтому сравнимость результатов, полученных в этих единицах, невозможна. В дальнейших наших исследованиях будем использовать единицы мутности, основанные на фармазине, как наиболее определенные.

**Источники излучения и детектора, используемые при измерении мутности жидкости.** Из источников излучения широкое распространение получили вольфрамовая лампа и источник монохроматического излучения в ближней ИК-области (чаще всего ИК-светодиод). Для источников белого света не существует турбидиметрической единицы мутности при измерении окрашенных жидкостей, так как они будут вносить погрешность в результаты измерений. Для приборов с ИК-источником окраска жидкостей не оказывают такого влияния, что позволяет использовать для измерения мутности такую единицу как FAU.

Способы детектирования удобно обозначать углом расположения детекторов:

180° — детектор расположен на одной оси с источником излучения, анализируя проходящий (турбидиметрический) через образец свет. Детектор применим для анализа неокрашенных жидкостей (или окрашенных при использовании ИК-источника) в диапазоне от 5 до 1000 FTU;

90° — детектор расположен под углом 90° к источнику излучения, анализируя свет, рассеянный под прямым углом (нефелометрия, единица измерения NUT). Детектор хорошо работает в области низких (< 5 FTU) значений мутности;

90° + XX° — помимо нефелометрического детектора, расположенного под углом 90°, используется один или несколько детекторов, расположенных под другими углами (обычно 180°, 45°, 135°, единица измерения NTU<sub>R</sub>), что обеспечивает большой измерительный диапазон;

детекторы, расположенные под другими углами к источнику излучения для обеспечения максимальной точности в требуемом диапазоне измерений. Наиболее известен детектор, установленный на 260—285°, так называемый детектор обратного рассеивания.

Примерная зависимость сигнала детектора от величины мутности приведена на рис. 1.

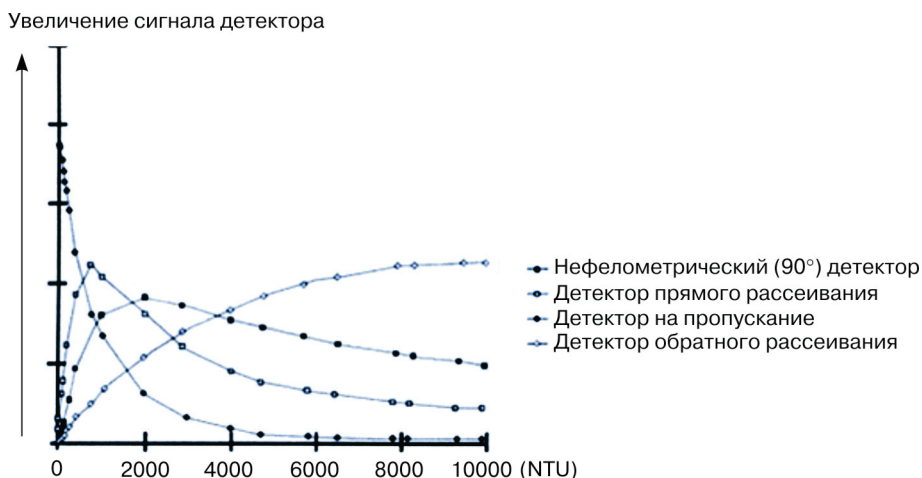


Рис. 1. Показания детекторов в зависимости от их места расположения

Из рис. 1 видно, что нефелометрический детектор имеет ограниченный диапазон применения и в сочетании турбидиметрическим детектором обеспечивает диапазон измерения до 1000—1100 FTU. В то же время применение дополнительных детекторов прямого и обратного рассеивания позволяет увеличить диапазон измерения на порядок. Важно заметить, что на приборе может быть установлено несколько детекторов, но в зависимости от режима и диапазона измерений может использоваться только один или несколько, что позволяет получать результаты в различных единицах (рис. 2).

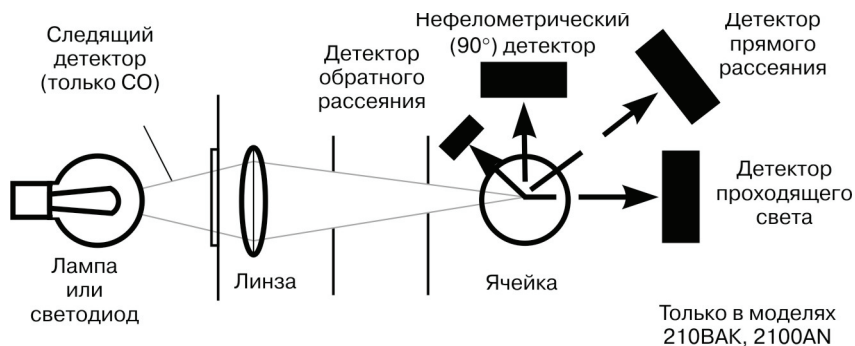


Рис. 2. Оптическая схема турбидиметров Nash, работающих на соотношении сигналов

Классификация единиц измерения мутности нужна для того, чтобы иметь информацию не о мутности как таковой, а о содержании взвешенных частиц, которые эту мутность обеспечивают. Природа анализируемых взвешенных частиц, их размеры, форма и концентрация являются определяющими в выборе соответствующих условий, а значит и единиц измерения. Из теории следует, что результаты измерений зависят от условий их проведения, природы образца и конструкции прибора. Требования к условиям и конструкции прибора могут настолько различаться, что даже о приблизительной корреляции результатов полученных в различных единицах говорить очень сложно.

Попытаемся выделить основные признаки, по которым можно было бы провести классификацию различных единиц измерения мутности:

- стандарты, используемые для калибровки прибора;
- источник излучения;
- схема расположения и количество детекторов (см. рис. 2).

Большое количество исследований современными способами в области качества поверхностной воды, которая в большой степени определяется наличием взвешенных наносов, позволяет расширить эти исследования применения новых методов анализа как самих частиц, так и их концентрации в потоке. Однако разнообразие единиц мутности вносит определенную путаницу в интерпретацию результатов. В практической работе исследователи сталкиваются с различными единицами мутности и при их сопоставлении должны учитывать следующее:

— используя при анализе различные единицы мутности даже по формазину, знак равенства между ними можно ставить только в точках калибровки, потому что неизвестно, как конкретная модель прибора на конкретном образце поведет себя далее;

— нельзя сравнивать результаты, полученные на приборах различной конструкции, даже если они были откалиброваны по одним стандартам;

— при выборе мутномера необходимо ориентироваться на действующий государственный отраслевой стандарт. Если такового не имеется, выбирать прибор следует, основываясь на возможной адаптации мутномера для конкретной задачи.

**Приборы, служащие для определения концентрации взвешенных наносов в потоке.** Для определения перемещения взвешенных наносов в речном потоке применяются батометры. Различия в характере перемещения взвешенных и донных наносов требует применять для их учета разные конструкции батометров.

С помощью батометров, определяющих количество взвешенных наносов, берут пробы воды с целью дальнейшего определения ее мутности. Пробы воды выдерживают в термостате и устанавливают мутность, численно равную содержанию (в граммах) взвешенных наносов на 1 м<sup>3</sup> воды. Могут быть установлены гранулометрический и минералогический составы взвешенных наносов; их гидравлическая крупность и другие характеристики. Батометры для изучения взвешенных наносов делятся на два типа — мгновенного и длительного наполнения. Батометры мгновенного наполнения представляют цилиндр, торцы которого снабжены захлопывающимися крышками. Через прибор, помещенный в заданном месте потока, на штанге проходит вода, а после срабатывания механизма крышек в батометре остается соответствующий объем воды с находящимися в ней взвешенными наносами.

Батометр длительного наполнения представляет собой емкость, например бутылку с широким горлом, которая заполняется в течение некоторого времени через трубку, вставленную в крышку горловины и направленную входным отвер-

стием навстречу течению. Вторая трубка, предназначенная для отвода воздуха из батометра, направлена вниз по течению и обеспечивает его беспрепятственный отвод. Одна из последних конструкций подобного типа — вакуумный батометр, емкость которого заполняется за счет превышения вакуумметрической высоты в камере и гидродинамического давления в исследуемой точке потока над глубиной погружения заборной трубы. Однако такой способ определения мутности потока достаточно трудоемкий и требует наличия лабораторного оборудования.

**Корреляция между измерениями мутности потока и концентрацией взвешенных частиц в нем (на примере водохранилища Дез, Иран).** Гидроузел Дез комплексного значения (энергетика и ирригация) расположен в горах Загрос на юго-западе Ирана. Сооружение было построено в 1963 г. с крупным русловым водохранилищем объемом  $3,315 \text{ км}^3$ . За период эксплуатации (40 лет) объем водохранилища был заилен до  $2,6 \text{ км}^3$ , что составило 19% от полного объема водохранилища и приблизительно равно его мертвому объему. Большая часть взвешенных и практически все донные наносы выпадают в верхней части водохранилища, формируя многорукавные устьевые участки, называемые дельтой. За дельтой образуется мелководный участок, называемый баром и заканчивающийся свалом глубин, сползающим медленно по руслу реки в сторону арочной плотины. Общий объем осадков, поступающий в водохранилище, составляет  $15,8 \text{ млн м}^3/\text{год}$ , из них  $1,84 \text{ млн м}^3/\text{год}$  достигают створа плотины в виде суспензионных потоков.

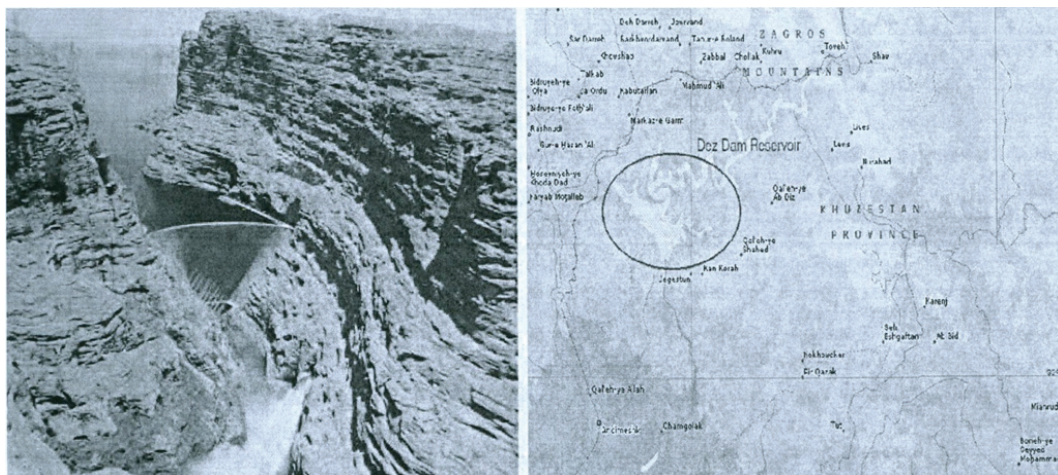


Рис. 3. Положение и координаты станций

Обычно заиление водохранилища имеет две стадии. При первой стадии в водохранилище происходит полное отложение всех поступающих наносов. На второй стадии наблюдается отложение наносов с затухающей интенсивностью. Сбросная мутность между тем возрастает и в конце заиления может быть равна бытовому. Интенсивность заиления бьефа может также характеризоваться степенью осветления  $\epsilon$  (доля наносов, задерживаемых верхним бьефом), которая

зависит от емкости бьефа, расхода воды, фракционного состава наносов и мутности потока и меняется от  $0 \leq \epsilon \leq 1$ . Гидроузел Дез в настоящий момент находится во второй стадии заиления, и сбросной расход из прозрачного превращается в более мутный с уменьшающейся ежегодно степенью осветления  $\epsilon$ .

В зоне устья водохранилища Дез образуются также плотные донные потоки, насыщенные мелкими взвешенными частицами. Будучи более тяжелыми, чем чистая вода, они опускаются ко дну водохранилища, транзитом перемещаются в придонной области до плотины и при открытых донных водовыпусках сбрасываются в нижний бьеф. Для образования донного потока необходима определенная разница в плотностях потока и воды в водохранилище. Достаточное содержание мельчайших илистых частиц наносов составляет не менее 50% частиц  $d < 0,015$ — $0,020$  мм, значительная мутность потока в бытовых условиях составляет примерно  $4$ — $5$  кг/м<sup>3</sup>. По результатам полевых исследований с декабря по апрель 2003 г. было зафиксировано два донных потока 28 и 29 января 2003 г., а также 23 и 24 апреля 2003 г. Мутность этих потоков составила 11 кг/м<sup>3</sup>, их плотность —  $1,014120$  т/м<sup>3</sup>.

Наибольшая концентрация взвешенных наносов в плотном потоке составила 7000 мг/л. Поток перемещался в пределах русла реки с толщиной слоя около 15 м и наибольшей концентрацией около русла, которая затем уменьшилась по мере роста глубины потока до 200 мг. Донный поток переносит около 13% всех взвешенных наносов, поступающих ежегодно в водохранилище, что составляет в среднем 1,84 млн м<sup>3</sup>/год. Для сброса донного плотного потока в нижний бьеф необходимо использовать донные водосбросы.

**Полевые исследования мутности потока.** При оценке мутности воды предпочтительно использовать нефелометрические единицы мутности NUT, где прибор (нефелометр) измеряет интенсивность рассеивания света датчиком, установленным под углом 90° к источнику излучения. Измерения проводились на трех станциях А, Д, Е, расположенных в водохранилище в русле реки (рис. 3). Эти результаты представлены на рис. 4—6.

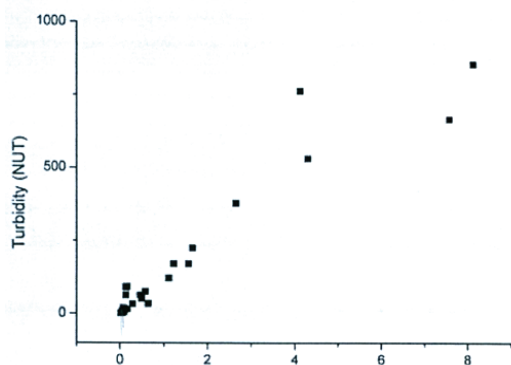


Рис. 4. Станция А

(взвешенные твердые вещества, TSS, г/л)

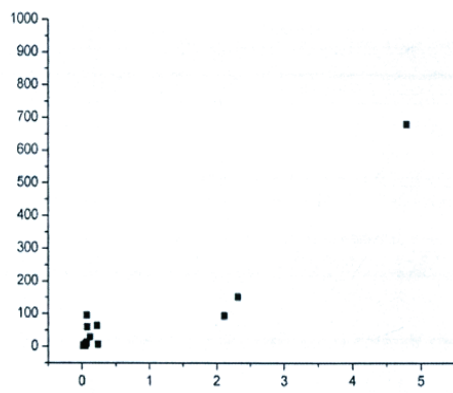
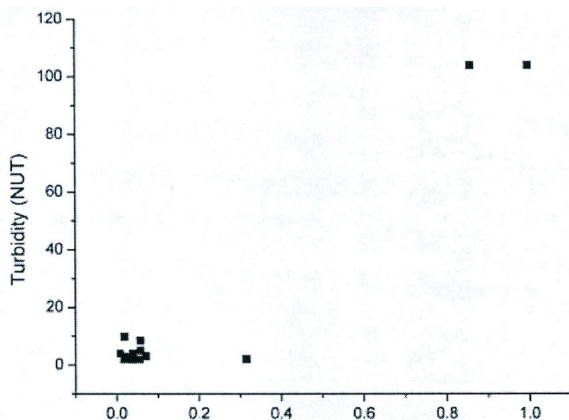
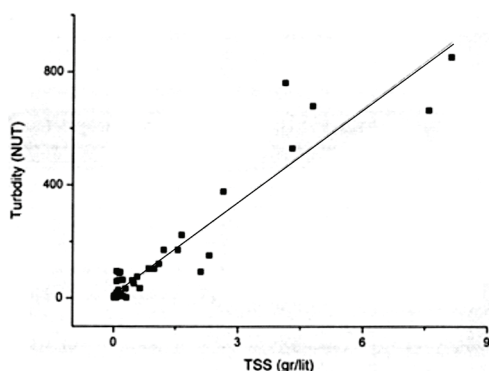


Рис. 5. Станция Д

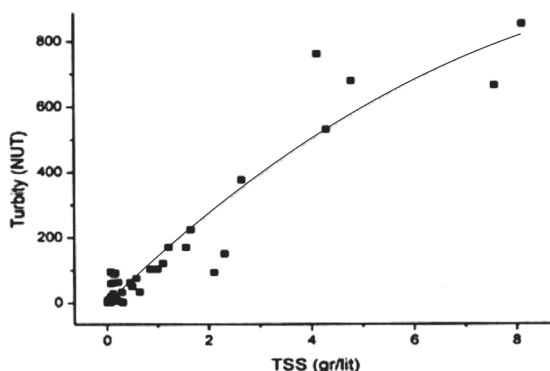
(взвешенные твердые вещества, TSS, г/л)



**Рис. 6.** Станция Е  
(взвешенные твердые вещества, TSS, г/л)



**Рис. 7.** Станции А, Д, Е



**Рис. 8.** Станции А, Д, Е

Для нахождения корреляции между мутностью потока, измеренных в нефелометрических единицах, и концентрацией взвешенных частиц в единице объема (г/л) результаты измерений по обрабатывались с помощью программы «Original lab» (см. рис. 7,8). Анализ, выполненный по этой программе, показал, что линейная (см. рис. 7) и полиномиальная (см. рис. 8) модели дают устойчивую корреляционную связь  $R_L = 0,9051$  и  $R_n = 0,9162$  между мутностью и концентрацией взвешенных частиц. Следовательно, мутность потока обеспечивает хорошую оценку концентрации взвешенных твердых частиц (TSS) в нем, хотя не является прямой мерой количества взвешенных частиц, находящихся в жидкости. Однако, используя полученные тарировочные кривые связи TSS и мутности на данном приборе можно нефелометрические единицы измерения переводить в г/л.

Линейная модель показала устойчивую корреляцию между TSS и мутностью ( $R_L = 0,9051$ ) с уравнением регресса  $NUT = 110,31 TSS + 8,54$  и для полиномиальной зависимости ( $R_n = 0,9162$ ) с уравнением  $NUT = 5,57 TSS^2 + 146,48 - 0,11$ . Эти результаты показывают, что мутность воды является хорошим параметром для оценки качества воды и количества твердых взвешенных частиц в ней.

Используя прибор одной конструкции, можно сравнивать результаты измерения, полученные в разных точках водохранилища.

Результаты измерения, полученные на приборе в нефелометрических единицах по тарировочным кривым или по уравнениям, можно перевести в концентрацию взвешенных частиц в единице объема (г/л).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Скрыльников В.А., Кеберле С.И. и др.* Повышение эффективности эксплуатации водохранилищ. — Ташкент: Мехнат, 1987. [*Skrylnikov V.A., Keberle S.I. i dr.* Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii vodohranilish. — Tashkent: Mehnat, 1987.]
- [2] *Караушев А.В.* Речная гидравлика. — Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969. [*Karavushev A.V.* Rechnaja gidravlika. — L.: Gidrometeorologitheskoe izdatelstvo, 1969.]
- [3] *Константинов Н.М. и др.* Гидравлика. Гидрология. Гидрометрия. — М.: Высшая школа, 1987. [*Konstantinov N.M. i dr.* Gidravlika. Hidrologija. Gidrometrija. — M.: Vysshaja Shkola, 1987.]
- [4] Теория и практика измерения мутности. Турбидиметрия и нефелометрия. — URL: [http://www.Ecoinstrumentnt.ru/service/public/teoriya\\_i\\_praktika\\_izmereniya\\_mutnosti\\_turbidimetriyi\\_nefelomeriya](http://www.Ecoinstrumentnt.ru/service/public/teoriya_i_praktika_izmereniya_mutnosti_turbidimetriyi_nefelomeriya) 28.01.13. [Теорія і практика вимірювання мутності. — URL: [http://www.Ecoinstrumentnt.ru/service/public/teoriya\\_i\\_praktika\\_izmereniya\\_mutnosti\\_turbidimetriyi\\_nefelomeriya](http://www.Ecoinstrumentnt.ru/service/public/teoriya_i_praktika_izmereniya_mutnosti_turbidimetriyi_nefelomeriya) 28 01.13г. ]

## TURBIDITY CURRENTS OF MODERN METHODS AND ITS CORRELATION WITH THE CONCENTRATION OF SUSPENDED PARTICLES PER UNIT VOLUME OF THE EXAMPLE RESERVOIR DES (IRAN)

V. Elfimov, Hamid Khakzad (Iran)

Department of hydraulics and hydraulic structures  
Engineering faculty  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Micluho-Maclaja str., 6, Moscow, Russia, 117198*

The problems of turbidity flow with suspended solids analyzer using photometric principle determining the light absorption and scattering in the layer of the analyte, provided that the light source and the detector is located on the same axis or at an angle 90° (nephelometer). However, to determine the rate of siltation of reservoirs, we need to know the weight of suspended particles per unit volume (concentration). Based on research conducted at the reservoir Des obtained correlations between measurements obtained with the nephelometer and the concentration of suspended solids (TSS).

**Key words:** stream turbidity, concentration of the weighed particles, zaileny reservoirs.