

Индикаторы возможного загрязнения воды патогенными микроорганизмами

*Кафедра военной эпидемиологии и военной гигиены ВМедФ в УО «БГМУ»¹
ГУ «23 СЭЦ Вооруженных Сил Республики Беларусь»²*

Ключевые слова: органические и неорганические вещества, соединения азота, окисляемость воды.

В статье представлены наиболее важные в гигиеническом отношении химические вещества и показатели, характеризующие качество воды с эпидемиологической точки зрения. Дана оценка их гигиенического значения при определении качества воды.

К их числу относятся наиболее важные химические вещества и показатели, характеризующие качество воды с гигиенической и эпидемиологической точек зрения. Это соединения азота, органические вещества, обуславливающие окисляемость; хлориды, фосфаты, растворенный кислород и биохимическая потребность воды в кислороде (БПК), сероводород, показатель концентрации водородных ионов (рН) [2].

Соединения азота. Азот в воде находится в составе как органических, так и неорганических соединений. Органический азот представлен продуктами разложения животных белков: низших пептидов, аминокислот и т.п. Сюда же относится азот, входящий в состав микроорганизмов, низших растений и неразложившихся остатков высших растений. В сумме они представляют так называемый альбуминоидный азот.

Неорганические соединения азота в природной воде – ионы аммония, азотистой и азотной кислот – появляются, главным образом, в результате конечного распада веществ белкового происхождения. Вначале образуется аммиак. Затем под действием ферментов нитрифицирующих бактерий в присутствии кислорода аммиак окисляется до азотистой кислоты, которую, в свою очередь, ферменты окисляют до азотной. Так заканчивается прямой цикл разложения азотсодержащих органических соединений, причем, скорость перехода азота из одного соединения в другое может быть различной. Самым недолговечным является ион азотистой кислоты (нитрит-ион). Более устойчив ион аммония (аммиак), однако и он довольно быстро переходит в наиболее стабильный ион азотной кислоты (нитрат-ион). Этим и объясняется различие содержания неорганических соединений азота в природных водах в зависимости от времени с момента их загрязнения продуктами белковой природы: чем оно дольше, тем меньше в воде остается аммония и больше – нитрат-иона. Наконец весь азот аммиака (нитритов) переходит в азот нитратов. Скорость этого процесса зависит от массивности загрязнения, температуры воды, ее солевого состава, наличия соответствующих микроорганизмов и других факторов. Важно иметь в виду, что параллельно идет процесс изменения микрофлоры воды – отмирание патогенных форм и микробов-показателей ее фекального загрязнения. Эта взаимозависимость является основанием для использования азотсодержащих веществ в качестве

показателей возможного загрязнения воды патогенными микроорганизмами. Альбуминоидный азот мог бы служить наиболее ярким индикатором загрязнения воды органическими веществами белковой природы, однако его определение в воде ограничено сложной методикой, трудностью дифференцирования азота животного и растительного происхождения и, самое главное, низкой информативностью. Дело в том, что альбуминоидный азот обнаруживается лишь в водах, очень сильно загрязненных хозяйственно-фекальными или промышленными стоками предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности, вследствие чего его определяют при контроле за сбросом данных стоков и за самоочисткой водоемов.

Аммиак (ион аммония) более доступен для определения и является довольно хорошим индикатором недавнего загрязнения воды органическими веществами белковой природы. Основные источники его поступления – животноводческие фермы, хозяйственно-бытовые сточные воды, поверхностный сток с удобренных сельхозугодий, а также сточные воды пищевой, коксохимической, лесохимической промышленности. Однако в некоторых случаях заведомо чистая вода может содержать ион аммония в весьма значительных количествах. Это относится к глубоким грунтовым водам (при восстановлении нитритов и нитратов сернистыми соединениями) и к воде, содержащей гумусовые вещества. Последние являются довольно сильными восстановителями, способными переводить нитраты в аммиак.

В доброкачественной воде других источников аммиак обычно отсутствует или содержится в ничтожных количествах (не более 0,2 мг/дм³), поэтому в каждом случае его обнаружения необходимо выяснить причины и источник происхождения (табл. 1).

Нитриты (ионы азотистой кислоты) могут оказать большую помощь в выяснении природы аммиачных соединений в исследуемой воде. По этому поводу Хлопин Г.В. писал: «...присутствие ничтожных количеств аммиачных соединений само по себе не считается особенно дурным признаком...дело существенно меняется, если одновременно с аммиачными соединениями питьевая вода содержит также азотистые соединения, которые считаются показателем несомненного загрязнения воды разлагающимися подозрительными азотистыми органическими соединениями...». К таким соединениям он относил, прежде всего, ионы азотистой кислоты, так как «...присутствие в воде для питья даже одной азотистой кислоты уже в высокой мере делает исследуемую воду подозрительной с точки зрения ее загрязненности, и требует внимательного обследования источника». Свои выводы Хлопин Г.В. подтверждал данными исследования загрязненной воды многих водоисточников, где наряду с аммиаком, как правило, обнаруживалась азотистая кислота.

Таблица 1. Содержание аммонийного азота в водоемах с различной степенью загрязненности (Я.П. Молчанова, Е.А. Заика и др., 2005)

Уровень загрязненности воды (класс качества)	Аммонийный азот, мг/дм ³
Очень чистые (I)	0,05
Чистые (II)	0,1
Умеренно загрязненные (III)	0,2-0,3
Загрязненные (IV)	0,4-1,0
Грязные (V)	1,1-3,0
Очень грязные (VI)	>3,0

Причинная связь между загрязнением воды подозрительными органическими веществами (животного происхождения) и наличием в ней, наряду с аммиаком, ионов азотистой кислоты, а также более редко встречающегося совместного присутствия этих химических веществ в водах, содержащих органические вещества растительного происхождения, по-видимому, обуславливается различием скоростей распада органических веществ растительного и животного происхождения. Последние, как известно, распадаются быстрее. Вследствие этого в водах, загрязненных продуктами животного происхождения, в каждый данный момент образуется такое количество ионов азотистой кислоты, которое можно обнаружить существующими методами. И наоборот, минерализация в воде органических веществ растительного происхождения замедлена настолько, что практически в ней могут определяться лишь начальные и конечные относительно стойкие вещества, такие как ионы аммиака и азотной кислоты. Что касается промежуточного вещества – иона азотистой кислоты, то вследствие крайней нестойкости его чаще всего обнаружить не удастся [3].

Таким образом, наиболее вероятным условием обнаружения нитрит-иона в воде является интенсивный распад относительно нестойких органических веществ животного происхождения, сопровождающийся активным процессом нитрификации. Присутствие в природных водах нитратов (ионов азотной кислоты) связано с нитрификацией аммонийных ионов, поступлением промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, стоком с сельскохозяйственных угодий, на которых применяются азотные удобрения. Возможно поступление нитратов в открытые водоемы и с атмосферными водами. При электрических разрядах в атмосфере кислород ионизируется и окисляет азот воздуха до окиси азота (NO), которая быстро переходит в двуокись азота (NO²). Последняя, соединяясь с атмосферной водой, образует азотистую и азотную кислоты. Следовательно, обнаружение после грозы ионов этих кислот в атмосферной воде и воде открытых водоемов не всегда свидетельствует об их загрязнении органическими веществами животного происхождения. Нитрат-ион как показатель загрязнения воды имеет меньшее значение. Обнаружение его при отсутствии аммиака и нитритов указывает на загрязнение воды в прошлом, а в грунтовых водах – на загрязнение почвы, через которую они проходили. Контроль содержания нитратов, особенно в грунтовых водах, обусловлен, главным образом, их возможным токсическим действием на организм человека.

Органические вещества, содержащиеся в природных водах, подразделяются на

аутохтонные, образующиеся в результате жизнедеятельности и распада водных организмов и растений, и гетерохтонные, поступающие извне с атмосферными осадками, хозяйственно-бытовыми и техническими сточными водами.

Химический состав их весьма сложен и разнообразен. Что касается агрегатного состояния, то они могут находиться в виде истинных растворов, коллоидных взвесей и в виде суспензий.

Поскольку количественная оценка имеющихся в воде отдельных органических веществ и соединений чрезвычайно затруднена, используется определение их суммарного содержания по разнице массы сухого остатка до и после прокаливании или, чаще всего, по количеству миллиграммов кислорода, затраченного на окисление органических веществ в 1 дм³ воды (окисляемость воды). В зависимости от применяемого окислителя существуют несколько видов окисляемости: перманганатная, бихроматная, йодатная. Чем сильнее окислитель, тем более полным будет результат. Так, при использовании бихромата калия окисляются до 90-95% имеющихся органических соединений, перманганата калия – только 40-45%. Бихроматную окисляемость называют химическим потреблением кислорода (ХПК). Следует учитывать, что помимо органических веществ в реакцию окисления могут вовлекаться и неорганические восстановители, поэтому величина окисляемости в определенной мере условна. Тем не менее, для бытовых сточных вод можно ориентировочно принять, что 1 мг загрязняющего органического вещества соответствует 1,2 мг/дм³ ХПК.

Количество органических веществ в природных водах может быть различным: в подземных водах обычно их мало (ХПК составляет десятые и сотые доли миллиграмма кислорода на 1 дм³ воды), в водах открытых водоемов – больше. Перманганатная окисляемость грунтовых вод достигает 2-4 мг/дм³, бихроматная (ХПК) – 5-6 мг/дм³; окисляемость воды поверхностных водоисточников – соответственно 6-8 и 10-15 мг/дм³. В гигиенической практике для оценки качества воды хозяйственно-питьевого назначения преимущественно используется перманганатная окисляемость, тогда как бихроматная окисляемость (ХПК) применяется для контроля состава и степени очистки сточных вод [1].

Гигиеническое значение органических веществ зависит от их происхождения. Органические вещества аутохтонного происхождения и компоненты почвенного гумуса, как правило, вреда для здоровья не представляют. Тем не менее, они снижают качество воды, придавая ей окраску и болотистый, а нередко и хлорфенольный запах; являются предшественниками вредных побочных продуктов хлорирования воды. Совершенно иное значение имеют органические вещества, поступающие с хозяйственно-бытовыми и техническими стоками. Их обнаружение свидетельствует об опасности заражения воды патогенными микроорганизмами, которые могут содержаться в фекальных стоках, или о возможном наличии токсических химических веществ, являющихся компонентами промышленных сточных вод. Следовательно, для оценки качества воды важно знать не только количество содержащихся в ней органических веществ, но и их происхождение [2].

В настоящее время рекомендуется использовать отношение величины окисляемости к градусу цветности, называемое удельной окисляемостью. Между окисляемостью, обусловленной гумусовыми и аутохтонными веществами, т.е.

веществами преимущественно растительной природы, и цветностью существует прямая зависимость. С увеличением цветности растет окисляемость воды, вследствие чего частное от деления этих величин (т.е. удельная окисляемость) почти не меняется. Иные отношения существуют между величиной окисляемости и цветностью в случае загрязнения воды органическими веществами животного происхождения. Здесь рост окисляемости почти не сопровождается ростом цветности, вследствие чего удельная окисляемость будет расти. Считается, что удельная окисляемость воды грунтовых колодцев в местности с подзолистой сухой почвой не должна превышать 0,3 [3].

Все большее распространение получает оценка органической загрязненности воды по содержанию в ней общего органического углерода. Директива Совета Европы 98/83/ЕС включает определение общего органического углерода (ТОС) в состав показателей, применяемых для мониторинга качества питьевой воды. Этот показатель используется пока только в целях нормирования качества бутилированной воды (для воды первой категории – не более 10 мг/дм³, для воды высшей категории – 5 мг/дм³), однако в научной практике ТОС применяется достаточно широко.

Кислород. Источником кислорода в природных водах являются атмосфера и жизнедеятельность водных хлорофиллоносных организмов. Содержание его в воде зависит от площади водной поверхности, сообщаемой с атмосферным воздухом, температуры, атмосферного давления, интенсивности протекающих в воде биологических и биохимических процессов. Подземные воды вследствие отсутствия соприкосновения с воздухом часто не содержат кислорода вовсе. В поверхностных водах содержание растворенного кислорода варьирует в широких пределах – от 0 до 14 мг/дм³ – и подвержено сезонным и суточным колебаниям. На содержание кислорода в воде влияют две группы противоположно направленных процессов: одни увеличивают его концентрацию, другие уменьшают. К первой группе относятся абсорбция кислорода из атмосферы, выделение его водной растительностью в процессе фотосинтеза, поступление в водоемы с дождевыми и снеговыми водами, которые обычно пересыщены кислородом. Причем, скорость поглощения кислорода из атмосферы возрастает с понижением температуры, ростом давления и снижением минерализации. К группе процессов, уменьшающих содержание кислорода в воде, относятся окисление органических веществ, дыхание водных организмов и бактерий, а также химическое окисление ряда неорганических элементов, обладающих восстановительными свойствами (железо, марганец и др.). Скорость потребления кислорода увеличивается с повышением температуры, количества бактерий и других водных организмов, и веществ, подвергающихся химическому и биохимическому окислению [2].

Количество кислорода в воде может служить косвенным показателем степени ее загрязнения. Вода считается чистой, если в ней содержится 80-90% кислорода от максимально возможного насыщения при данной температуре, загрязненной – 60-75%, и грязной – при наличии кислорода менее 40-50% от максимального насыщения (табл. 2). Согласно санитарным нормам, содержание кислорода в воде водоемов в любой период года должно быть не менее 4 мг/дм³ в пробе, отобранной до 12 часов дня.

Биохимическая потребность в кислороде (БПК). Вследствие значительных колебаний содержания кислорода в природных водах более ценным показателем чистоты воды является степень уменьшения его содержания в течение некоторого срока хранения воды в герметизированной посуде при определенной температуре. Чем больше в воде акцепторов кислорода (органических веществ, микроорганизмов), тем меньше его останется через определенный промежуток времени. На этом эффекте основан используемый в санитарно-гигиенической практике показатель биохимического потребления кислорода в течение 5 или 20 суток (БПК5 или БПК20).

Таблица 2. Содержание кислорода в водоемах с различной степенью загрязненности (Я.П. Молчанова, Е.А. Заика и др., 2005)

Уровень загрязненности воды (класс качества)	Растворенный кислород		
	лето, мг/дм ³	зима, мг/дм ³	% насыщения
Очень чистые (I)	9	14-13	95
Чистые (II)	8	12-11	80
Умеренно загрязненные (III)	7-6	10-9	70
Загрязненные (IV)	5-4	5-4	60
Грязные (V)	3-2	5-1	30
Очень грязные (VI)	0	0	0

Для вычисления БПК исследуемую воду путем энергичного встряхивания насыщают кислородом воздуха и, после определения его исходного содержания, ставят в плотно закрытой стеклянной склянке на 5 или 20 суток при температуре 20°С, после чего вновь определяют содержание кислорода. Считается, что за 20 суток в воде, загрязненной хозяйственно-бытовыми стоками, происходит практически полное окисление органики, т.е. БПК20 = ХПК, вследствие чего БПК20 обозначают еще как БПКполн. При определении БПК5 в конце 5-го дня наступает 70% окисление, т.е. ХПК -1,4 БПК5. Однако в связи со значительным загрязнением бытовых сточных вод это соотношение не всегда достоверно. Вода считается очень чистой, если количество кислорода в ней за 5 суток уменьшилось на 1 мг/дм³, чистой – до 2 мг/дм³, загрязненной – более 3 мг/дм³[1].

Показатель БПК5 используется для характеристики процессов самоочищения водоемов, а также для расчета предельно допустимых сбросов загрязняющих веществ с промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами.

Согласно санитарным правилам, при выпуске сточных вод в водоемы первой категории, т.е. используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, величина БПК5 не должна превышать 2 мг/дм³ в точке, удаленной от места выпуска не далее 500 м. Для водоемов второй категории, используемых для рекреационных целей, а также расположенных в населенных местах, эта величина не должна превышать 4 мг/дм³.

Соединения фосфора. Фосфор в природных водах находится в виде неорганических соединений и органических комплексов различной степени сложности. Подземные воды содержат крайне незначительное количество фосфатов (не более 100 мкг/дм³); исключения составляют воды в районах залегания фосфорсодержащих пород (апатиты и фосфориты). В поверхностные водоисточники фосфор может поступать вследствие растворения фосфорных

соединений, содержащихся в земной коре, или распада органических веществ белковой природы. Значительное количество фосфора поступает с хозяйственно-бытовыми сточными водами и в результате смыва минеральных удобрений с полей. Так, с одного гектара орошаемых земель выносится 0,4-0,6 кг фосфора; со стоками ферм поступает 0,01-0,05 кг/сутки на одно животное. Сброс неочищенных или недостаточно очищенных канализационных сточных вод обеспечивает поступление в водоемы 0,003-0,006 кг фосфора от одного жителя в сутки.

Необходимо отметить, что фосфор (как и азот) относится к истинным биогенным элементам, накопление которых в поверхностных водоемах ведет к неконтролируемому росту растительной биомассы. Происходит изменение трофического статуса водоема (эвтрофикация): в нем преобладают гнилостные процессы вследствие недостатка кислорода, интенсивно поглощаемого растущими водорослями. Основную роль в эвтрофикации играет фосфор: 1 кг его в виде фосфатов при благоприятных световых условиях обеспечивает продуцирование 100 кг органических веществ.

Один из вероятных аспектов процесса эвтрофикации – рост массы сине-зеленых водорослей (цианобактерий), многие из которых токсичны. Выделяемые ими вещества (альготоксины) относятся к группе фосфор- и серосодержащих органических соединений, т.е. к нервно-паралитическим и гепатотоксическим ядам. В целом, накопление фосфора в водоисточниках приводит к ухудшению гидробиологического режима и опасности их загнивания.

Сероводород в природной воде может находиться в виде растворенного газа, ионов сероводородной кислоты, а также солей этой кислоты – сульфидов.

Образование его в природных водах связано с восстановлением сульфатов в анаэробных условиях с помощью ферментов сульфатредуцирующих бактерий, а также с гниением органических веществ белковой природы. В подавляющем большинстве природных вод сероводород отсутствует. Там, где он встречается, содержание его обычно не превышает нескольких десятых миллиграмма на 1 дм³ воды. Однако в некоторых водах глубокого грунтового происхождения количество его может достигать 40 мг/дм³. С выходом на земную поверхность сероводород довольно быстро уходит в атмосферу, а в присутствии кислорода окисляется до свободной серы. Этому процессу значительно способствуют серобактерии, являющиеся как бы антагонистами сульфатредуцирующих микробов.

Гигиеническое значение сероводорода заключается в его влиянии на запах воды. Уже концентрация порядка 0,28 мг/дм³ является крайним пределом переносимости. Какого-либо другого вредного влияния на организм человека сероводород, содержащийся в природных водах, обычно не оказывает. В том случае, если источником сероводорода являются гниющие органические вещества белковой природы, он может служить показателем загрязнения воды. В связи с этим при обнаружении сероводорода всегда следует выяснить его происхождение.

Хлориды, т.е. собственно анионы хлора, соединенные с одним из катионов, чаще всего с натрием, широко распространены и встречаются во всех природных водах. Содержание их подвержено очень большим колебаниям – от долей

миллиграмма до нескольких десятков граммов на 1 дм³ воды.

В воду хлориды попадают из почвы (особенно загрязненной), из осадочных и магматических пород в результате их выветривания, а также с хозяйственно-бытовыми и промышленными стоками. В связи с этим значение хлоридов для оценки качества воды двоякое. С одной стороны они влияют на вкусовые свойства воды, с другой – могут служить показателем возможного ее загрязнения. Санитарно-показательное значение хлоридов заключается в том, что они постоянно присутствуют в составе хозяйственно-бытовых стоков. Несмотря на то, что установить источник их происхождения в природных водах нередко очень трудно, тем не менее, в сумме других данных они могут иметь известное значение, особенно для оценки воды подземных источников. Так, колебания их количества на протяжении определенного времени (дней, недель, месяцев), тем более после выпадения осадков, указывает на подток в обследуемый источник поверхностных почвенных вод, что, как известно, делает воду ненадежной в смысле возможного загрязнения ее патогенными микроорганизмами.

Реакция воды (рН). Величина рН природных вод зависит, главным образом, от диссоциации растворенных в них угольной кислоты и ее солей и в норме колеблется от 6,5 до 8,5. Увеличение количества растворенной угольной кислоты приводит к снижению рН. Однако это увеличение нередко влечет за собой повышение содержания солей кальция, магния и других щелочно-земельных и щелочных металлов, которые действуют в обратном направлении, т.е. повышают рН, снижая концентрацию водородных ионов вследствие реакции гидролиза. На величину рН вод лесисто-болотистого происхождения большое влияние оказывает диссоциация органических кислот, содержащихся в гумусовых веществах. Некоторые из них, например, фульвокислоты, могут быть весьма сильно диссоциированы и значительно снижать рН воды (иногда до 4 и ниже).

Гигиеническое значение рН заключается в том, что этот показатель в определенной степени свидетельствует о содержании в воде тех или иных солей и органических веществ, главным образом, растительного происхождения. Кроме того, значительные отклонения рН от обычных величин (в особенности, резкие их колебания) могут происходить вследствие попадания в воду промышленных и бытовых стоков, а в военное время – различного рода отравляющих веществ.

Установление прямым путем факта загрязнения воды патогенными микроорганизмами характеризуется сложностью и длительностью, а также недостаточной достоверностью результатов в случаях, если они окажутся отрицательными. В этой ситуации вывод об отсутствии или наличии патогенных микробов делается на основании данных, полученных косвенными путями, в том числе посредством определения охарактеризованных выше химических соединений и показателей. Использование в целях контроля качества воды этих простых, но достаточно информативных критериев позволяет оперативно определять наличие загрязнения воды без развернутого лабораторного исследования, что весьма существенно в полевых условиях и в боевой обстановке.

Литература

1. Дорошевич, В. И. Гигиена водоснабжения войск: учеб.-метод. пособие / В. И.

- Дорошевич, Ю. Ю. Варашкевич. Минск: БГМУ, 2001. 40 с.
2. Кошелев, Н. Ф. Гигиена водоснабжения войск: учеб. пособие / Н. Ф. Кошелев, В. И. Нарыков, В. М. Осипов. СПб.: Петроглиф, 2008. 312 с.
3. Общая и военная гигиена / под ред. Б. И. Жолуса. СПб.: ВМедА, 1996. 472 с.