

# ЛАНДШАФТОВЕДЕНИЕ И ГЕОХИМИЯ

Т. Т. Ефремова, С. П. Ефремов, Н. В. Мелентьева

## ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД БОЛОТНОЙ ГИДРОГРАФИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИЕНИСЕЙСКОГО ЗАПОЛЯРЬЯ

На основе широкомасштабных исследований характеризуются поверхностные воды в зоне влияния крупнейшего на Севере Норильского горно-металлургического комплекса. Приводится геохимическая классификация, рассматриваются генезис и современные тенденции состояния этого важного компонента природной среды региона.

Для природно-территориальных комплексов Приенисейского Заполярья характерны криогенные геологические процессы и явления (термокарст, солифлюкация, криогенное пучение, криогенное растрескивание, ледообразование, абляция, суффозия и другие), которые ведут к реконструкции поверхности, почвенно-растительного покрова и к активному заболачиванию территории. Этому способствует и положительный водный баланс, обусловленный превышением осадков над испарением при недостатке стока.

Согласно болотному районированию Красноярского края [Пьявченко, 1963], объектами исследования стали районы: а) полигональных и плоскобугристых болот, б) крупнобугристых торфяников. Общий признак для всех торфяников данного типа — чередование бугров, т. е. возвышенных мерзлых участков торфяного массива, с тальми понижениями. Мощность торфяной залежи бугров — 1-2,6 м. Под торфом находится мерзлое минеральное основание, возвышающееся над уровнем мочажин. Торфяная залежь бугров сложена торфами низинного типа — осоковыми, гипново- и сфагново-осоковыми малой степени разложения. Глубина торфа в мочажинах от 0,8 до 3 м. По ботаническому составу он в общем сходен с торфами бугров. В растительном покрове бугров довольно часто встречаются лиственница, ель, береза. В травяно-кустарничковом покрове преобладают багульник, карликовая береза, менее представлены морошка, брусника, голубика. В напочвенном покрове господствуют лишайники с различным участием мха *Pleurozium schreberi*. Растительный покров мочажин образован осоками, вахтой, сфагновыми мхами и в меньшей мере гипновыми. В современный период торфонакапление происходит преимущественно в мочажинах, на буграх оно или подавлено или совсем не проявляется вследствие пересыхания их поверхности.

Термокарст на мерзлых органогенных и рыхлых минеральных породах, связанный с разрушением внутригрунтового (сегрегационного и залежеобразующего) льда, обуславливает образование провальных форм рельефа. В сочетании с криогенным пучением это приводит к тому, что поверхность болотных массивов приобретает сложный морфоструктурный облик. Прослеживается их своеобразная вертикально-горизонтальная ступенчатость, препазирующая различную «врезанность» и гипсометрическую соподчиненность малых и средних форм рельефа. Разновысотные торфяные бугры с минеральным ядром чередуются со вторичными озерами и озерами, имеющими то торфяные, то торфяно-минеральные или минеральные днища. Вторичные

озера, будучи замкнутыми (бессточными) или проточными, сливаются друг с другом вплоть до формирования ориентированных тальвегов, захватываются первичными и (или) возвращающимися явлениями заторфовывания.

Характерной особенностью природно-территориальных комплексов Приенисейского Заполярья является широкое развитие сульфидной медно-никелевой минерализации. К Приенисейскому мегаблоку приурочены уникальные медно-никелевые месторождения Норильского рудного района. В пределах мегаблока последовательно (с запада на восток) формируются щелочные и щелочно-базитовые, затем базитовые и гипербазит-базитовые, толеитовые (трапповые), щелочно-гипербазитовые, кимберлитовые продукты магматизма, составляющие определенные звенья в латеральном и возрастном ряду магматизма и эндогенного рудообразования.

Природные воды, контактируя с разнообразными химическими вариациями горных пород, неизбежно приобретают специфический состав, адекватно отражающий во времени и пространстве естественную изначальную мозаичность условий их формирования. Помимо естественных факторов, гидрогеологическая и гидрохимическая ситуация в Норильском промышленном районе определяется также эмиссией в атмосферу серы и тяжелых металлов предприятиями цветной металлургии. Аэрозольные техногенные выбросы по-разному аккумулируются на водосборных площадях в зависимости от их вида, удаленности от источника выбросов, компонентного и агрегатного состава техногенных потоков, геоморфологии территории, господствующей розы ветров, погодных условий, времени года и других факторов. Процессы внутриландшафтной миграции химических элементов также развиваются неоднозначно. Геоморфологически подчиненные торфяно-болотные экосистемы могут играть положительную роль в аккумуляции и «гашении» экологически опасных техногенных потоков. Торфяники представляют собой совмещенный геохимический барьер — механический, кислородный, биогенный и сорбционный, на котором накапливаются многие химические элементы [Тайсаев, 1981]. Однако буферная «емкость» гидроморфных комплексов имеет определенный порог устойчивости, за пределами которого начинается деградация самой системы. Поэтому в условиях высоких техногенных нагрузок на окружающую среду проблема охраны природных водных ресурсов становится одной из наиболее актуальных.

Цель настоящей работы состояла в следующем. В сравнении с водами рек и первичных (глубинных) озер: а) определить химический состав вод болотной гидрографической сети и провести на этой базе их классификацию, б) проанализировать содержание водорастворимых Cu, Ni, Co, Pb, отражающих элементный состав сульфидных руд, в) оценить уровень загрязненности поверхностных вод тяжелыми металлами и серой.

### **Объекты и методы исследования**

В полевые сезоны 2001-2003 гг. исследованиями были охвачены заболоченные бассейны рек Бол. Авам, Норильская, Рыбная, Омунтах, Амбарная, «висячие» болота гор Хаералах, бугристые торфяники в окрестностях г. Кайеркан — оз. Буровое, аэропорта Алыкель — Вологочан, а также м. Блудный (в районе оз. Мелкое). Непосредственными пунктами отбора проб служили болотные озера термокарстового происхождения; транзитные воды вышележащих болот, аккумулированные в озерках (менее 1 га) на склоновых (висячих) торфяниках; трещинные (щелевые) болотные воды мерзлых торфяных бугров; болотные воды озер на различных высотах относительно подножия крупного торфяного бугра. Параллельно отбирались пробы вод в реках Бол.

Авам, Верх. Агапа, Агапа, Амбарная, Норильская, Рыбная, Ергалах, а также в оз. Мелкое и водопаде «Красные камни».

Определение pH, водорастворимого углерода, кальция, магния, хлора и гидрокарбоната выполнено по руководству [Унифицированные методы..., 1973]. Калий, натрий, водорастворимые тяжелые металлы и сера определены по методическим указаниям [РД 52.24.406-95; РД 52.24.391-95; ИСО 8288-86]. Геохимическая классификация вод проведена по [Перельман, Касимов, 1999].

### **Химический состав и классификация поверхностных вод**

По щелочно-кислотным условиям поверхностные воды Приенисейского Заполярья относятся главным образом к классу нейтральных и слабощелочных (табл. 1). Это класс вод (pH 6,5-8,5), к которому относится большинство природных вод суши. В водной фазе торфяников реакция среды составляет преимущественно pH 6,4-7,4, подобно низинным болотам зоны бореальных лесов. Миграция большинства металлов в этих водах ограничена, так как они осаждаются в форме нерастворимых комплексов гидроксидов, карбонатов и других соединений. Значительно реже встречаются воды других классов. Так, сильноокислые воды (pH 3,6-4,0) обнаружены в болотных озерах пригорода Оганер, г. Кайеркан (пробы 226, 306), трещинных водах плоскобугристого торфяника в районе аэропорта Алыкель (35б). Кислотность таких вод в природе обычно связана с окислением дисульфидов, приводящем к образованию серной кислоты в районах исследования могут быть и выбросы оксидов серы предприятиями цветной металлургии. В сильноокислых водах легко мигрирует большинство металлов. В окрестностях пригорода Оганер обнаружены также сильнощелочные воды с pH > 9 — тальвег, врезанный в минеральное ложе торфяника (236), и болотное озеро у минерального подножия крупного торфяного бугра (246). Сильнощелочная среда обусловлена, по всей вероятности, контактом с засоленными минеральными грунтами реликтового генезиса. Это подтверждается ионным составом болотных вод (сравнительно большое количество  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и даже  $\text{CO}_3^{2-}$ ), а также геологической историей формирования территории. Показано, что в мезозое Енисейско-Хатангская впадина была затоплена мелководным морем, обусловившим засоление субаквальных грунтов [Суслов, 1954]. В щелочных содовых водах легко мигрируют кремнезем, гумус,  $\text{AlO}_2^-$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ , а также карбонатные растворимые комплексы Cu, Zn, Sc, Zr, Be и других металлов.

По степени минерализации (сумма растворенных катионов и анионов) изучаемые поверхностные воды относятся к семействам ультрапресных (< 100 мг/л) и пресных (100-1000 мг/л). Воды почти всех рек, оз. Мелкое и водопада «Красные камни» ультрапресные. Пресными являются только воды рек Амбарная и Ергалах (189,1 и 119,8 мг/л соответственно). Болотные воды в целом более минерализованы: 41,7 % из них относятся к ультрапресным, 58,3 % — к пресным (101,2-918,6 мг/л). Это обусловлено выносом химических элементов с водосборной площади и аккумуляцией их в гипсометрически пониженных элементах рельефа. Наиболее минерализованы болотные воды пригорода Оганер, расположенного вблизи источника техногенных выбросов.

Все категории вод содержат небольшое количество водорастворимого органического вещества (РОВ) — 0,62-4,51 мг/л и по данному признаку относятся к роду вод, бедных РОВ. Такая особенность обусловлена тем, что разложение остатков организмов в тундре протекает медленно, минерализация и гумификация выражены слабо.

**Химический состав и классификация поверхностных вод рек,  
озер и болот Приенисейского Заполярья (фаза межени)**

№ пробы**	Пункты отбора проб вод	C, мг/л	Химический состав*	Виды вод
1р	Русло р. Бол. Авам	2,8	M <sub>54</sub> $\frac{HCO^3 40}{Ca25Mg19}$ pH <sub>7,1</sub>	Гидрокарбонатные кальциево-магниевые
2б	Мочажина в заболоченном листовничнике берегового склона	3,8	M <sub>53</sub> $\frac{HCO^3 34Cl10SO^4 8}{Ca28Mg19Na9}$ pH <sub>6,9</sub>	Гидрокарбонатные кальциевые
3р	Русло р. Верх. Агапа	2,5	M <sub>33</sub> $\frac{HCO^3 Cl11SO^4 8}{Ca24Mg24}$ pH <sub>7,1</sub>	Гидрокарбонатные кальциево-магниевые
4р	Русло р. Агапа	2,4	M <sub>42</sub> $\frac{HCO^3 20Cl11SO^4 21}{Ca22Mg22}$ pH <sub>6,9</sub>	Сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-магниевые
5р	Устье р. Норильская	1,6	M <sub>56</sub> $\frac{HCO^3 23Cl10SO^4 15}{Ca31Mg14}$ pH <sub>7,2</sub>	Гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые
6о	Акватория оз. Мелкое	2,9	M <sub>48</sub> $\frac{HCO^3 20Cl12SO^4 18}{Ca28Mg17}$ pH <sub>6,4</sub>	То же
7б	Озеро на склоновом торфяном болоте м. Блудный	4,5	M <sub>137</sub> $\frac{HCO^3 32SO^4 14}{Ca31Mg18}$ pH <sub>7,0</sub>	Гидрокарбонатные кальциевые
8б	Термокарстовое озеро на бугристом торфянике м. Блудный	2,4	M <sub>61</sub> $\frac{HCO^3 16SO^4 30}{Ca29Mg18}$ pH <sub>6,5</sub>	Сульфатные кальциевые
12б	Термокарстовое болотное озеро в 100 м от берега р. Норильская	1,4	M <sub>190</sub> $\frac{HCO^3 39SO^4 9}{Ca22Mg22}$ pH <sub>7,6</sub>	Гидрокарбонатные кальциево-магниевые
13б	Термокарстовое болотное озеро в 200 м от берега р. Норильская	2,9	M <sub>112</sub> $\frac{HCO^3 33SO^4 12}{Ca25Mg20}$ pH <sub>7,4</sub>	То же
14б	Озерко «висячего» мелкозалежного болота в горах Хаералах	2,2	M <sub>48</sub> $\frac{HCO^3 20Cl6SO^4 24}{Ca22Mg25}$ pH <sub>6,5</sub>	Сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые
15в	Водопад «Красные камни» в окрестностях г. Талнах	1,1	M <sub>51</sub> $\frac{HCO^3 25Cl8SO^4 15}{Ca27Mg21}$ pH <sub>7,1</sub>	Гидрокарбонатные кальциево-магниевые
16б	Озеро нижнее между торфяными буграми в районе г. Талнах	0,6	M <sub>101</sub> $\frac{HCO^3 38SO^4 8}{Ca24Mg22}$ pH <sub>7,4</sub>	То же
17б	Озеро верхнее на торфяном бугре в районе г. Талнах	1,2	M <sub>200</sub> $\frac{HCO^3 41SO^4 7}{Ca24Mg23}$ pH <sub>7,3</sub>	»
18б	Щелевые воды торфяного бугра в районе г. Талнах	1,2	M <sub>40</sub> $\frac{HCO^3 6SO^4 36}{Ca25Mg22}$ pH <sub>6,4</sub>	Сульфатные кальциево-магниевые
19р	Устье р. Рыбная	2,6	M <sub>49</sub> $\frac{HCO^3 19Cl11SO^4 18}{Ca30Mg16}$ pH <sub>6,9</sub>	Гидрокарбонатно-сульфатные кальциевые
20р	Устье р. Ергалах	2,1	M <sub>120</sub> $\frac{HCO^3 20SO^4 25}{Ca33Mg15}$ pH <sub>7,3</sub>	Сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые
21б	Озеро на торфянике левобережья р. Омунтах	2,7	M <sub>230</sub> $\frac{HCO^3 8SO^4 40}{Ca29Mg17}$ pH <sub>7,0</sub>	Сульфатные кальциево-магниевые
22б	Озерко на торфянике со следами пожара в районе п. Оганер	3,1	M <sub>85</sub> $\frac{SO^4 40}{Ca35Mg12}$ pH <sub>3,6</sub>	Сульфатные кальциевые
23б	Тальвег, врезанный в минеральное ложе торфяника п. Оганер	1,4	M <sub>187</sub> $\frac{HCO^3 23SO^4 22}{Ca24Mg22}$ pH <sub>9,1</sub>	Гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-магниевые

№ пробы**	Пункты отбора проб вод	C, мг/л	Химический состав*	Виды вод
24б	Озеро у минерального подножия торфяного бугра п. Оганер	1,4	M <sub>918</sub> $\frac{\text{HCO}^3\text{14Cl11SO}^4\text{19}}{\text{Ca9Mg6Na34}}$ pH <sub>10</sub>	Сульфатно-гидрокарбонатные натриевые
25б	Озеро на высоте 5 м от подножия торфяного бугра п. Оганер	1,6	M <sub>290</sub> $\frac{\text{HCO}^3\text{10SO}^4\text{38}}{\text{Ca25Mg21}}$ pH <sub>7,4</sub>	Сульфатные кальциево-магниевые
26б	Озеро на высоте 10 м от подножия торфяного бугра п. Оганер	2,1	M <sub>337</sub> $\frac{\text{SO}^4\text{42}}{\text{Ca26Mg23}}$ pH <sub>7,2</sub>	То же
27б	Озеро на высоте 15 м от подножия торфяного бугра п. Оганер	2,5	M <sub>227</sub> $\frac{\text{SO}^4\text{44}}{\text{Ca24Mg17}}$ pH <sub>6,1</sub>	»
28р	Русло р. Амбарная в районе г. Кайеркан	0,6	M <sub>189</sub> $\frac{\text{HCO}^3\text{24SO}^4\text{25}}{\text{Ca25Mg22}}$ pH <sub>7,0</sub>	Гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-магниевые
29б	Болотное озеро на береговом склоне р. Амбарная	0,6	M <sub>183</sub> $\frac{\text{HCO}^3\text{31SO}^4\text{16}}{\text{Ca25Mg20}}$ pH <sub>7,5</sub>	Гидрокарбонатные кальциево-магниевые
30б	Озеро на заболоченном плато долины р. Амбарная	1,6	M <sub>62</sub> $\frac{\text{SO}^4\text{45}}{\text{Ca31Mg17}}$ pH <sub>4,1</sub>	Сульфатные кальциевые
31б	Нижнее болотное озеро в долине р. Амбарная	1,5	M <sub>66</sub> $\frac{\text{HCO}^3\text{32Cl6SO}^4\text{12}}{\text{Ca27Mg20}}$ pH <sub>7,5</sub>	Гидрокарбонатные кальциево-магниевые
32б	Верхнее болотное озеро в долине р. Амбарная	0,6	M <sub>228</sub> $\frac{\text{HCO}^3\text{36SO}^4\text{12}}{\text{Ca27Mg21}}$ pH <sub>6,9</sub>	То же
33б	Большое болотное озеро в районе аэропорта Алыкель — Вологочан	1,2	M <sub>45</sub> $\frac{\text{HCO}^3\text{30Cl12SO}^4\text{7}}{\text{Ca28Mg16}}$ pH <sub>6,5</sub>	Гидрокарбонатные кальциевые
34б	Болотная мочажина торфяника в районе Алыкель — Вологочан	2,2	M <sub>21</sub> $\frac{\text{Cl14SO}^3\text{34}}{\text{Ca37Mg12}}$ pH <sub>5,5</sub>	Сульфатные кальциевые
35б	Щелевые воды торфяника в районе Алыкель — Вологочан	3,1	M <sub>17</sub> $\frac{\text{Cl16SO}^3\text{33}}{\text{Ca35Mg14}}$ pH <sub>4,0</sub>	То же

\* По формуле Курлова [Алекин, 1948]: в числителе дроби — анионы, в знаменателе — катионы, присутствующие в количестве больше 5 мг-экв. от суммы ионов. Перед дробью — величина минерализации (мг/л), за дробью — величина pH.

\*\* Условные обозначения: г — город, п — пригород, б — болото, в — водопад, о — озеро, р — река.

Ионный состав вод определяет их важные геохимические особенности и положен в основу классификации вод по виду. В составе анионов болотных, речных и озерных вод преобладают гидрокарбонаты и сульфаты. Содержание  $\text{HCO}_3^-$  — ведущего аниона слабominерализованных вод сильно варьируется — 1,2-238 мг/л. В сильнощелочных болотных водах обнаруживается ион  $\text{CO}_3^{2-}$  в количестве 2,6 и 3,9 мг/л (23б, 24б соответственно). В кислых водах болот (pH < 4) ион гидрокарбоната не встречается (22б, 30б, 35б). Варьирование аниона  $\text{SO}_4^{2-}$ , подобно  $\text{HCO}_3^-$ , также велико — 3,9-249 мг/л. В речных водах содержание сульфатов приближается к средней концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$  в водах суши в целом, составляющей 12 мг/л, согласно [Добровольский, 1998]. Болотные воды содержат сульфатов значительно больше, как правило, в 2-3 раза. Особенно богаты ионом  $\text{SO}_4^{2-}$  воды крупнобугристого торфяника Оганер (пробы 21б, 24-27б), расположенного в эпицентре техногенных выбросов ГМК «Норильский никель». Превышение относительно среднего показателя для вод суши в целом достигает здесь порядка и больше.

Количество хлора в поверхностных водах невелико — 2,6-12,2 мг/л, что типично для рек, озер и болот северных территорий. Высокое содержание Cl (104,3 мг/л) обнаружено только в болотном озере крупнобугристого торфяника (24б) на уровне минерального подножия (вероятно, засоленного), обна-

женного в результате солифлюкации. При контакте вод с засоленными породами хлор легко выщелачивается и аккумулируется в озере. Обогащенность легкорастворимыми солями ложа болота, вероятно, реликтовая, морского генезиса: хлор является главным анионом в морях и соляных озерах. Об этом же свидетельствует аномально высокое количество натрия в пресных водах — 224,8 мг/л. Оно в 4 раза превосходит содержание кальция и является результатом обменной сорбции кальциевых вод с натрием в породах морского происхождения. Здесь же обнаруживается самая высокая концентрация  $K^+$  (20–29 мг/л), которая во всех других объектах не превышает 1,96 мг/л.

В составе катионов доминируют кальций (4,0–55,4 мг/л) и магний (0,90–28,5 мг/л). В исследуемых водах соотношение  $Ca^{2+}: Mg^{2+}$  составляет в основном 2:1, изменяясь в отдельных случаях до 4:1. Такие результаты соответствуют в целом соотношению ведущих катионов в пресных природных водах [Алекин, 1948].

По преобладающим ионам и их соотношению проведено определение вида вод — самого мелкого таксона классификации А. И. Перельмана, Н. С. Касимова. На территории Приенисейского Заполярья выделено 9 видов вод (см. табл. 1). По анионному составу: гидрокарбонатные и сульфатные (при содержании данного аниона более 25 % мг-экв. от суммы ионов, согласно [Алекин, 1970]) и комбинированные — гидрокарбонатно-сульфатные и сульфатно-гидрокарбонатные (в случае превышения 25 % мг-экв. двумя анионами). По катионному составу: кальциевые, кальциево-магниевые, магниевые-кальциевые и натриевые. Гидрокарбонатные кальциевые и кальциево-магниевые воды болот, рек и озер в холодных гумидных областях являются зональными. Сульфатно-гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-сульфатные воды отражают, вероятно всего, региональную специфику, обусловленную сульфидными месторождениями руд. Такие воды характерны для рек Агапа, Норильская, Рыбная, Ергалах, Амбарная, оз. Мелкое и ряда болотных экосистем (14б, 23б, 24б, 29б). Сульфатные воды присущи только болотам, в тундровых ландшафтах это явление азональное [Перельман, Касимов, 1999], так как географически они в большей мере соответствуют центральной и южной частям степной зоны.

Прослеживается два возможных источника ионов  $SO_4^{2-}$ . Первый — природный. Изучаемая территория приурочена, как показано выше, к Талнахско-Норильской группе месторождений сульфидных медно-никелевых руд. На сульфидных месторождениях в многолетнемерзлых породах возникают мерзлые ландшафты сернокислого класса [Тайсаев, 1981]. Контактное взаимодействие поверхностных и грунтовых вод с сульфидными рудами меди, никеля, цинка, других тяжелых металлов и их окисление формируют кислые сульфатные воды [Перельман, Касимов, 1999]. Однако сульфатно-гидрокарбонатные и сульфатные воды Приенисейского Заполярья за небольшим исключением — нейтральные и слабощелочные. Эта особенность, на наш взгляд, определяется внутренним строением сульфидных рудоносных интрузивов Талнахско-Норильской группы месторождений. В частности, установлена субщелочная тенденция внутрикамерной дифференциации Талнахского сульфидного массива, которая связана с интенсивным ощелочением исходного гипербазит-базитового расплава. При контакте со щелочами подземные сульфидные воды нейтрализуются. Сообщаясь с поверхностными водами по региональным глубинным разломам, они обогащают их сульфатами: Норильский рудный район находится в экстремальных условиях разгрузки напряжений со стороны рифтогенных (щелевидных, ровообразных) структур.

Второй источник поступления сульфатов в водную среду, безусловно, техногенный. В составе промышленных выбросов предприятий ГМК «Нориль-

ский никель» сера и ее соединения составляют значительную часть. Поэтому трансформация вод низинных болот — типичных геохимически подчиненных ландшафтов в сульфатные вполне закономерна.

Сульфатные ультрапресные и пресные воды болотных экосистем по своим щелочно-кислотным свойствам относятся к различным классам: нейтральным и слабощелочным, сильнокислым и сильнощелочным (сульфатно-гидрокарбонатные). Эту принадлежность использовали для предварительной оценки вклада возможных источников поступления  $\text{SO}_4^{2-}$  в водную среду.

Нейтральные и щелочные слабоминерализованные сульфатные воды болотных экосистем в большей мере отражают, на наш взгляд, субщелочную тенденцию внутрикамерной дифференциации Талнахско-Норильского сульфидного массива. Имеющийся в ряде случаев техногенный привнос  $\text{SO}_3$  нейтрализуется элементами-комплексообразователями (тяжелыми металлами) и катионогенными элементами (кальцием, магнием и др.) в составе пылевых выбросов промышленных предприятий. Сульфатные воды этого класса обнаружены в термокарстовом озере бугристого болота на м. Блудный (86), в трещинных (щелевых) водах мерзлого торфяного бугра окрестностей г. Талнах (186) и наиболее компактно в озерах крупнобугристого торфяника в районе Оганер, пригорода г. Норильска (216, 25-276). Здесь же обнаружены и сильнощелочные воды (236, 246), происхождение которых, является, по всей вероятности, результатом криогенных процессов. Благодаря солифлюкации реликтовые засоленные грунты минерального ложа торфяника могут выходить на поверхность. В результате обменных процессов натрий переходит в раствор и болотные воды постепенно трансформируются в сильнощелочные сульфатно-гидрокарбонатные натриевые.

Сильнокислые и кислые сульфатные воды низинных болот (рН 3,6-5,5) менее распространены. Локализованы они преимущественно в озерах заболоченной долины р. Амбарная (вблизи г. Кайеркан), в мочажинах и трещинных (щелевых) водах полигонального торфяника Алыкель, западнее г. Норильска (226, 306, 346, 356). Допускаем, что формирование кислых сульфатных вод напрямую связано с воздействием техногенных потоков оксида серы. Перечисленные объекты достаточно удалены от источника выбросов. Поэтому в составе аэрозолей доминируют наиболее летучие (газовые) компоненты: взвеси тяжелых металлов переносятся на меньшие расстояния. Ультрапресные и пресные болотные воды, не насыщенные практически всеми минеральными соединениями, обладают большой растворяющей способностью, а недостаток оснований не позволяет в полной мере нейтрализовать объем ежегодных выпадений  $\text{SO}_3$ . В результате происходит постепенное снижение рН и закисление вод. Возможно также, что формирование кислых сульфатных вод болотных экосистем является в какой-то мере следствием природных процессов. В мерзлотных районах, как показано выше, сульфидные месторождения имеют зону окисления сульфатного типа с образованием серной кислоты и легкорастворимых сульфатов Fe, Cu, Zn и других металлов. Косвенно в пользу этой версии свидетельствует самое высокое содержание железа именно в сильнокислых сульфатных водах — 1000-740 мкг/л относительно других объектов — 361-3,6 мкг/л.

### **Содержание водорастворимых форм тяжелых металлов и оценка уровня загрязненности поверхностных вод**

Количество растворимых Ni, Cu, Co, Pb в поверхностных водах Приенисейского Заполярья сильно колеблется как по категориям вод (болотные,

речные, озерные), так и по районам исследования (табл. 2, 3). Коэффициент вариации изменяется от 45 до 223. В наибольшей мере варьируется содержание кобальта во всех категориях вод ( $C_v = 93-223 \%$ ), а также свинца в болотных водах, отнесенных к условно загрязненным ( $C_v = 120 \%$ ). В других случаях, подобно никелю и меди, коэффициент вариации находится в пределах 45-82 %.

Таблица 2

**Содержание тяжелых металлов в поверхностных водах  
Приенисейского Заполярья, мг/л (фаза межени)**

№ пробы	Ni	Cu	Co	Pb	№ пробы	Ni	Cu	Co	Pb
	0,02-27*	0,2-30	0,04-8	0,06-120		0,02-27	0,2-30	0,04-8	0,06-120
1р	0,16	1,62	< 0,01	0,57	18б	3,15	10,50	0,47	< 0,10
2б	1,37	5,24	< 0,01	< 0,1	19р	0,88	4,73	< 0,01	0,65
3р	0,99	2,69	0,27	0,52	20р	2,24	7,02	< 0,01	1,19
4р	0,92	1,84	< 0,01	0,31	21б	4,21	4,28	< 0,01	0,59
5р	1,10	6,46	< 0,01	0,29	22б	285,0	485,00	25,40	3,40
6о	0,28	1,24	0,29	0,66	23б	6,79	10,90	< 0,01	0,87
7б	2,96	3,96	< 0,01	0,82	24б	102,0	16,30	0,85	0,71
8б	4,29	4,82	< 0,01	0,78	25б	259,0	229,00	4,63	< 0,1
9м	0,82	1,06	0,25	< 0,10	26б	345,0	314,00	6,01	< 0,1
10м	0,37	1,98	< 0,01	0,57	27б	293,0	158,00	19,00	0,48
11м	0,80	1,85	0,42	< 0,10	28р	2,15	2,40	< 0,01	0,67
12б	8,36	9,44	< 0,01	0,86	29б	9,12	6,47	< 0,01	0,93
13б	0,10	0,10	< 0,01	< 0,10	30б	85,60	55,50	6,01	1,22
14б	1,40	2,42	< 0,01	0,44	31б	9,45	8,67	< 0,01	0,90
15в	0,47	1,99	< 0,01	0,45	32б	6,14	5,17	< 0,01	1,32
16б	5,97	3,24	< 0,01	1,36	33б	1,76	2,12	< 0,01	0,60
17б	3,43	8,53	< 0,01	0,35	34б	5,27	7,28	0,96	< 0,10
					35б	5,66	7,83	1,16	0,45

**Примечание.** Районы отбора и индексы проб вод см. в табл. 1.

\* Содержание тяжелых металлов в речных и пресных водах гидросферы Земли в целом (по: [Bowen, 1979]).

Таблица 3

**Описательная статистика содержания тяжелых металлов  
в поверхностных водах Приенисейского Заполярья (фаза межени)**

Элементы	m	$s_x$	min	max	R	$S_x^2$	$S_x$	$C_v$
<b>Воды торфяных болот — природный фон, <math>\Sigma_{TM} - 4,5-19,0</math> мг/л</b>								
Co	0,16	0,087	0,01	1,16	1,15	0,128	0,358	223
Pb	0,57	0,088	0,1	1,32	1,22	0,131	0,361	63
Ni	4,67	0,675	0,1	9,45	9,35	7,751	2,784	60
Cu	5,94	0,755	0,1	10,9	10,8	9,685	3,112	52
<b>Воды торфяных болот — условно загрязненные, <math>\Sigma_{TM} - 145-800</math> мг/л</b>								
Co	10,31	3,924	0,85	25,4	24,55	92,392	9,612	93
Pb	1,00	0,509	0,1	3,4	3,3	1,556	1,248	124
Ni	228,27	44,075	85,6	345	259,4	11655,5	107,96	47
Cu	209,63	70,92	16,3	485	468,7	30179	173,72	82
<b>Воды рек, озер, водопада, <math>\Sigma_{TM} - 2,5-10,4</math> мг/л</b>								
Co	0,07	0,039	0,01	0,29	0,28	0,014	0,119	170
Pb	0,59	0,089	0,29	1,19	0,9	0,071	0,266	45
Ni	1,02	0,247	0,16	2,24	2,08	0,549	0,741	72
Cu	3,33	0,726	1,24	7,02	5,78	4,744	2,178	65

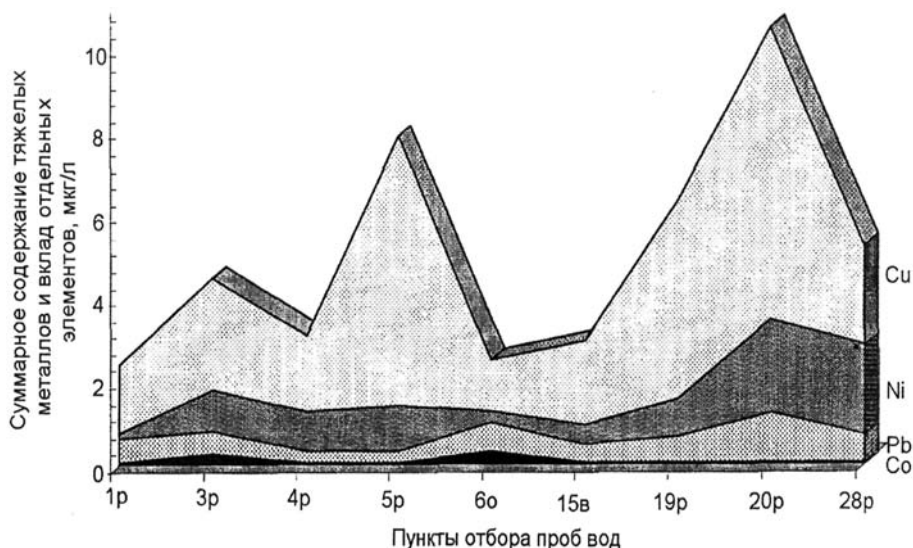
**Примечание:** m — среднее, мг/л;  $s_x$  — ошибка средней; min — минимум; max — максимум; R — размах;  $S_x^2$  — дисперсия;  $S_x$  — стандартное отклонение;  $C_v$  — коэффициент вариации;  $\Sigma_{TM}$  — сумма водорастворимых тяжелых металлов.



Низкая концентрация металлов отмечается в водопаде «Красные камни», реках и озерах, расположенных севернее, северо-восточнее и восточнее г. Норильска: Верх. Агапа и Агапа, устье Норильской, Бол. Авам и оз. Мелкое. Суммарное содержание тяжелых металлов в ультрапресных и пресных водах рек, озер с нейтральной и щелочной реакцией среды почти не превышает 10 мкг/л. Достаточно мало Cu, Ni, Co, Pb содержится и в поверхностных водах окрестностей г. Талнах — 3-14 мкг/л, несколько больше — 5-19 мкг/л — в районе Кайеркан — Вологочан преимущественно в водах болотных экосистем. Исключением здесь является болотное озеро с сильнокислыми сульфатными водами (левобережье р. Амбарная), где сумма водорастворимых металлов повышается до 150 мкг/л. Однако наибольшая концентрация тяжелых металлов выявлена в болотных экосистемах пригорода Оганер. В термокарстовых озерах, сформированных на различных высотах крупнобугристого торфяника, суммарное количество тяжелых металлов варьируется от 140 до 800 мкг/л. Максимум обнаружен в водах торфяника, пройденного беглым огнем.

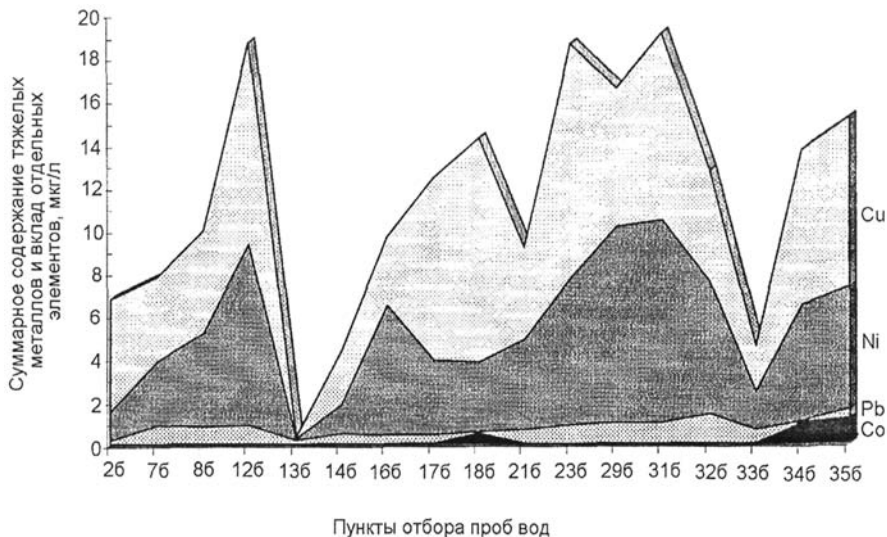
На основе такого анализа поверхностные воды разделяем на три группы по величине накопления тяжелых металлов: 1) речные и озерные; 2) болотные, с низким содержанием Ni, Cu, Co, Pb, которые в первом приближении рассматриваем в качестве природного фона; 3) болотные, максимально обогащенные тяжелыми металлами (условно загрязненные).

Как следует из табл. 3, суммарное содержание тяжелых металлов в водах рек и озер Приенисейского Заполярья составляет 2,5-10,4 мкг/л. Среднее количество Co — 0,07, Pb — 0,59, Ni — 1,02, Cu — 3,33 мкг/л. Наибольший вклад в суммарное загрязнение вносят медь и никель (рис. 1). Установлено, что средняя концентрация тяжелых металлов в речных и пресных водах гидросферы Земли в целом равняется: Co — 0,25 (пределы колебаний 0,04-8), Pb — 1,0 (0,06-120), Ni — 2,5 (0,02-27), Cu — 7,0 (0,2-30) мкг/л [Добровольский, 1998; Bowen, 1979]. Сравнение цифр позволяет констатировать, что речные и озерные воды обсуждаемой территории не загрязнены тяжелыми металлами.



**Рис. 1.** Накопление тяжелых металлов и изменение вклада отдельных элементов в водах рек, озер, водопада (пункты отбора проб см. в табл. 1)

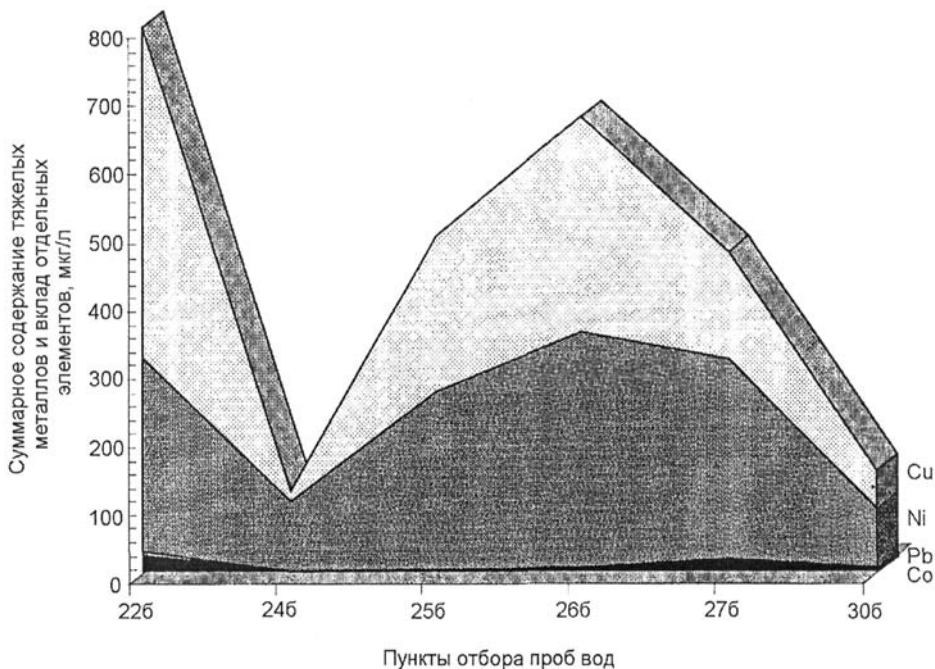
В водах болотных экосистем, относящихся по геохимическому сопряжению к подчиненным ландшафтам, суммарная концентрация тяжелых металлов заметно выше — 4,5-19,0 мкг/л. Кратность превышения относительно речных и озерных составляет: Ni (4,6) > Co (2,3) > Cu (1,8) > Pb (0,97). Это означает, что болотные воды, характеризующие природный фон, аккумулируют в 4,6 раза больше никеля, в 2,3 раза — кобальта, в 1,8 раза — меди. Обращает на себя внимание тот факт, что в суммарном количестве водорастворимых тяжелых металлов доля никеля в болотных экосистемах возрастает до 20-63 % по сравнению с 8-48 % в реках и озерах (рис. 2). Содержание свинца не изменяется; попадая в водоем, он быстро сорбируется донными осадками независимо от источника поступления [Максимова, Соколова, 1993].



**Рис. 2.** Накопление тяжелых металлов и изменение вклада отдельных элементов в болотных водах природного фона (пункты отбора проб см. в табл. 1)

Суммарная концентрация тяжелых металлов в болотных водах, условно загрязненных, возрастает до 145-800 мкг/л. Содержание отдельных элементов составляет: Co — 10,31, Pb — 1,0, Ni — 228,27, Cu — 209,63 мкг/л. Кратность превышения относительно природного фона болот следующая: Co (64,4) > Ni (48,9) > Cu (35,3) > Pb (1,75). Наибольший вклад в загрязнение по-прежнему вносят медь и никель (рис. 3). При этом доля никеля в суммарном загрязнении тяжелыми металлами продолжает расти и достигает 33-83 %. Роль кобальта и особенно свинца ничтожно мала.

Оценка уровня загрязненности вод производилась по шкале в соответствии с кратностью превышения уровня ПДК [Емельянова и др., 1983]. Если превышение составляет не более 2 ед., уровень загрязненности — низкий, 2-10 — средний, 10-50 — высокий, 50-100 — очень высокий. Кратность превышения нормативов рассчитывалась по формуле  $K_i = C_i / C_{\text{ПДК}}$ , где  $K_i$  — кратность превышения ПДК по  $i$ -му ингредиенту;  $C_i$  — концентрация  $i$ -го ингредиента в водном объекте, мкг/л;  $C_{\text{ПДК}}$  — предельно допустимая концентрация  $i$ -го ингредиента, мкг/л.



**Рис. 3.** Накопление тяжелых металлов и изменение вклада отдельных элементов в загрязненных болотных водах (пункты отбора проб см. в табл. 1)

Воды большинства болот, рек и озер Приенисейского Заполярья не загрязнены тяжелыми металлами: концентрации Ni, Cu, Co, Pb значительно ниже уровней ПДК. В озерах крупнобугристого торфяника Оганер с самым высоким содержанием меди и никеля (эпицентр техногенной эмиссии) отмечается кратность превышения ПДК по никелю в 2,6-3,4 раза, что отражает средний уровень загрязненности болотных вод данным металлом (табл. 4).

Таблица 4

**Оценка уровня загрязненности\* болотных вод торфяника Оганер с самым высоким содержанием никеля и меди в составе водорастворимых тяжелых металлов**

Место отбора проб вод	№ пробы	Ni (ПДК = 100 мкг/л**)			Cu (ПДК= 1000 мкг/л)		
		Содержание, мкг/л	K***	Уровень загрязненности	Содержание, мкг/л	K	Уровень загрязненности
Озеро на торфяном бугре со следами беглого пожара	226	285	2,8	Средний	485	0,5	Не загрязнены
Озеро на высоте 5 м от подножия торфяного бугра	256	259	2,6	»	229	0,2	То же
Озеро на высоте 10 м от подножия торфяного бугра	266	345	3,4	»	314	0,3	»
Озеро на высоте 15 м от подножия торфяного бугра	276	293	2,9	»	158	0,2	»

\* По: [Емельянова и др., 1983].

\*\* По: [Питьевая вода..., 1996].

\*\*\* Кратность превышения ПДК.

## **Выводы**

1. Поверхностные воды евтрофных болот Приенисейского Заполярья, подобно рекам и озерам, относятся в основном к классу нейтральных и слабощелочных, к семейству ультрапресных и пресных, к роду бедных растворенным органическим веществом. Гидрохимический фон представлен гидрокарбонатными кальциевыми и кальциево-магниевыми водами. Региональную специфику, связанную с залежами в недрах сульфидных медно-никелевых руд, отражают гидрокарбонатно-сульфатные (сульфатно-гидрокарбонатные) воды.

2. Ультрапресные и пресные сульфатные воды, свойственные только болотным экосистемам, относятся к различным классам по кислотно-щелочным условиям. Нейтральные и слабощелочные выявляют субщелочную тенденцию внутрикамерной дифференциации сульфидных месторождений Норильского рудного района. Сильнощелочные сульфатно-гидрокарбонатно-натриевые связаны с криогенными процессами и формируются в результате взаимодействия вод с засоленными минеральными грунтами, обнаженными вследствие оплывания оттаявшей толщи торфа (солифлюкация). Сильнокислые сульфатные являются, скорее всего, продуктом трансформации нейтральных и слабощелочных гидрокарбонатных (гидрокарбонатно-сульфатных) вод вследствие промышленной эмиссии оксидов серы. Активное подкисление свидетельствует о неустойчивости водной фазы болот к техногенным выбросам из-за отсутствия механизмов, поддерживающих ее в стабильном состоянии (низкая минерализация, высокая растворяющая способность, недостаток оснований).

3. Природный гидрохимический фон болотных экосистем по тяжелым металлам составляет в первом приближении: Co — 0,16, Pb — 0,57, Ni — 4,67 и Cu — 5,94 мкг/л. В большинстве случаев поверхностные воды не загрязнены тяжелыми металлами: их миграция в нейтральных и слабощелочных водах ограничена. Установлена тенденция увеличения вклада никеля в суммарное загрязнение вод по мере его возрастания. В непосредственной близости от источника промышленных выбросов болотные озера загрязнены никелем на среднем уровне.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- Алекин О. А.* Общая гидрохимия. Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 206 с.
- Алекин О. А.* Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.
- Добровольский В. В.* Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 413 с.
- Емельянова В. П., Данилова Г. Н., Колесникова Т. Х.* Оценка качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям // Гидрохимические материалы. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. Т. 88. С. 119-129.
- ИСО 8288-86.* Раздел 1. Метод А. Качество воды. Определение кобальта, никеля, меди, цинка, кадмия и свинца. Пламенные атомно-абсорбционные спектрофотометрические методы.
- Максимова М. П., Соколова С. А.* Критерии оценки антропогенной составляющей содержания тяжелых металлов в речном стоке // Водные ресурсы. 1993. Т. 20, № 2. С. 270-272.
- Перельман А. И., Касимов Н. С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрейя-2000, 1999. 768 с.
- Питьевая вода.* Гигиенические требования к качеству воды центральных систем питьевого водоснабжения: санитарные правила и нормы. М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996. 111 с.
- Пьявченко Н. И.* К изучению болот Красноярского края // Заболоченные леса и болота Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 5-32.

РД 52.24.391-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации натрия и калия в поверхностных водах суши пламенно-фотометрическим методом. Ростов н/Д, 1995.

РД 52.24.406-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации сульфатов в водах титриметрическим методом с солью бария. Ростов н/Д, 1995.

Суслов С. П. Физическая география СССР. Т. 2. Азиатская часть. М.: Гос. уч.-пед. изд-во, 1954. 711 с.

Тайсаев Т. Т. Геохимия таежно-мерзлотных ландшафтов и поиски рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1981. 136 с.

Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1973. 376 с.

Bowen H. J. M. Environmental chemistry of the elements. London: Acad. Press, 1979. 333 p.

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН,  
г. Красноярск*

*T. T. Yefremova, S. P. Yefremov, N. V. Melentyeva*

***ECOLOGICAL-AND-GEOCHEMICAL TAXATION WITH REGARD  
TO SURFACE WATERS OF BOG HYDROGRAPHIC NETWORK  
IN THE YENISEI ARCTIC REGION***

*Basing on large-scale investigations, the paper gives a description of surface waters in the zone of impact produced by Norilsk mining and smelting complex, the biggest in the North. The authors consider geochemical classification and genesis thereof, as well as present tendencies in the state of this important regional environment component.*