

УДК 504.4

Особенности выпадения и стока неорганического азота на севере Русской равнины

В.А. Фёдорова, Н.П. Торсуев

В статье рассмотрены нарушения биогеохимического цикла азота в результате интенсивной хозяйственной деятельности. В основу работы положена информация о концентрациях различных форм неорганического азота за период 1985 по 2000 гг. на 27 гидролого-гидрохимических постах и 14 метеостанциях, расположенных на севере Русской равнины. Проведен анализ внутригодовых изменений содержания азота аммонийного, нитратного, нитритного и суммарного в поверхностных водах и атмосферных осадках. Выявлено превышение выпадений неорганического азота над количеством данного элемента, переносимого речным стоком в 1,8–32,1 раза (средний показатель для данного региона составляет 9,5 раза), что объясняется активным включением азота в биологические циклы, а также его накоплением в почвенном покрове. Анализ многолетних изменений выявил четкую тенденцию снижения выпадений и стока аммонийного и суммарного азота и обратную тенденцию для нитратного азота за 1985–2000 гг. Крупные аномалии в выпадениях всех форм азота свойственны МС Череповец, Вологда, Мудьюг (гг. Архангельск, Северодвинск, Новодвинск).

Ключевые слова: азот аммонийный; азот нитратный; суммарный азот; биогеохимический цикл азота; атмосферные осадки; ионный сток; гидролого-гидрохимический пост; метеостанция; концентрация; модуль выпадения осадков.

Рост хозяйственной деятельности последних 5–6 десятилетий обусловил нарушение сложившегося природного равновесия, а в итоге техногенному воздействию подвергаются геохимические циклы большинства химических элементов. В условиях интенсивного развития производства существенно изменяется и поведение главного биофильного элемента – азота.

Существует множество публикаций, рассматривающих нарушения биогеохимического цикла азота в результате интенсивной хозяйственной деятельности [2–5]. Отмечается, что в его круговорот вовлекается значительное количество связанного азота антропогенного происхождения. В результате – количество всех форм антропогенной фиксации азота сопоставимо с количеством биогеннофиксируемого азота. В частности В.Н. Василенко, Р.Т. Карабань, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман (1989) отмечают заметный вклад антропогенного аммонийного азота (около 1,3 млн. т/год) на ЕТС, который практически вдвое превышает поступление от природных источников [1]. Хорошо известно, что химический состав атмосферных осадков оказывает существенное влияние на формирование качественного состава поверхностного и подземного стока. Последнее, естественно, свойственно и неорганическому азоту.

Исходными информацией данной публикации послужили материалы Северного управления Росгидромета за период 1985 по 2000 гг. В её основу положены наблюдения по 27 гидролого-гидрохимическим постам (ГГХП) и 14 метеостанциям (МС), расположенным на севере Русской равнины. Годовой квазицикл поверхностных вод традиционно подразделялся на зимнюю межень, весеннее половодье и летне-осенний период. Сток соединений азота по ним рассчитывался как средневзвешенный по водному стоку, что позволяет учесть изменения водности. Анализ поступлений азота аммонийного, нитратного и суммарного с осадками проводился по холодному и теплему сезонам, а также в целом за год. За первый из них принимался отрезок времени с ноября по апрель включительно, за второй – с мая по октябрь.

Модуль выпадений осадков определялся для каждого месяца как произведение их количества по каждой МС на концентрацию ионов:

$$M = S_i \cdot C_i \cdot 10^{-3},$$

где M – модуль выпадений, т/км²; S_i – количество осадков по каждому посту, мм; C_i – концентрация ионов, мг/л.

Анализ концентраций различных форм неорганического азота в природных водах региона показал, что преобладающей из них в атмосфер-

ных осадках и воде рек является аммонийный азот, составляющий 20–84 и 40–100% соответственно. Второе место занимает азот нитратный – 16–80% от суммарного азота в атмосферных

осадках и 0–58% в речных водах. Неустойчивость нитритной формы определяет его низкую долю – 0–8%.

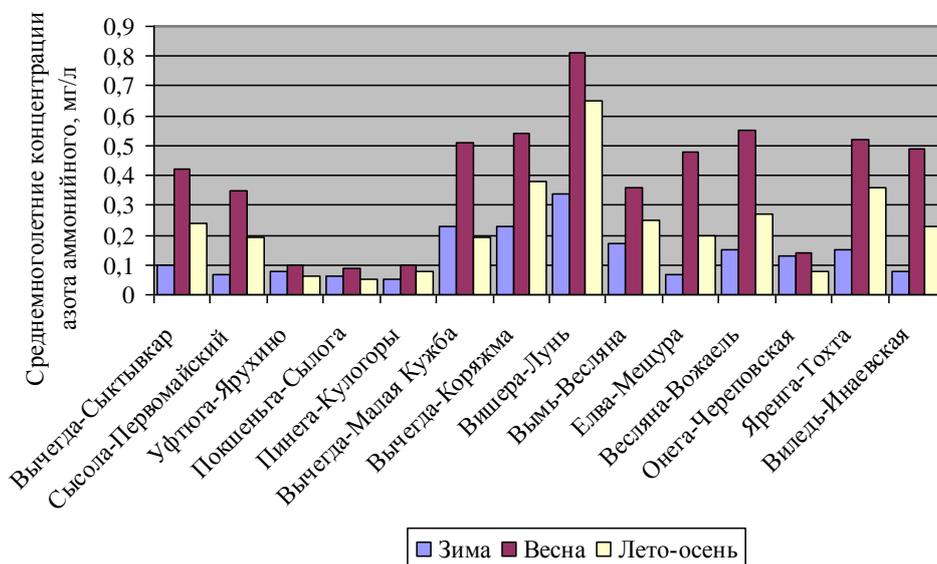


Рис. 1. Средние многолетние концентрации азота аммонийного в различные гидрологические сезоны в поверхностных водах севера Русской равнины

Анализ многолетней информации внутригодовых изменений азота аммонийного отчетливо показал рост его содержания в периоды весеннего половодья, что обусловлено стоком загрязняющих веществ (ЗВ) с водосборов, и летне-осенних паводков, характеризующихся выпадением большого количества осадков (рис. 1).

Весной за анализируемый период 1985–2000 гг. в воде рек региона концентрация азота аммонийного изменяется от 0 до 1,23 мг/л (при средних – 0,05–0,81 мг/л) (табл. 1). В атмосферных же осадках большинства МС севера за тот же сезон содержание данного компонента варьирует от 0,03 до 3,01 (при среднем значении 0,11–1,11 мг/л). В результате, средние значения азота аммонийного в атмосферных осадках в 1,4–2,2 раза превышают его концентрации в поверхностных водах.

В летне-осенний период содержание аммонийного азота в воде рек колеблется от 0 до 1,70 мг/л (при средних – 0,05–0,65 мг/л), тогда как его концентрация в осадках теплого периода изменяется от 0,01 до 7,82 мг/л (при средних 0,26–1,62 мг/л), превышая в итоге в 2,5–5,2 раза среднее содержание данного поллютанта в речных водах.

Что касается зимней межени, то следует отметить, что для данного периода характерно замедление скорости биохимических процессов, а также – отсутствие поступлений ЗВ с водосбора. Все это обуславливает более низкий уровень содержания азота аммонийного в зимний сезон (рис. 1). Так, содержание аммонийного азота в воде рек находится в диапазоне от 0 до 0,85 мг/л (при средних – 0,04–0,43 мг/л). В атмосферных же осадках холодного периода содержание данного компонента варьирует от 0,03 до 3,01 (при среднем значении 0,11–1,11 мг/л), а в итоге, средние значения содержания азота аммонийного в осадках в 1,7–2,8 раза превышают концентрации в поверхностных водах.

Таким образом, максимальное превышение концентраций азота аммонийного в осадках над его содержанием в воде рек зафиксировано в летне-осенний период, что определяется интенсивным потреблением данного ингредиента биотой именно в период вегетации.

Поскольку информация о содержании нитритного азота в атмосферных осадках отсутствует, то мы вынуждены ограничиться анализом изменчивости данного компонента в воде рек.

Нитриты, обнаруживаемые в повышенном количестве, указывают на усиленное разложение органических остатков и задержку окисления NO_2^- до NO_3^- . Большую часть года в поверхностных водах нитритный азот аналитически не обнаруживается либо фиксируется, но в очень ничтожных количествах. Естественно, к концу теплого периода его содержание несколько увеличивается, поскольку, как известно, усиливается распад органического вещества. Так, концентрация азота нитритного в летне-осенний сезон изменяется от 0 до 0,04 мг/л (при средних – от 0 до 0,01 мг/л).

В весенний же сезон содержание данного компонента колеблется в интервале от 0 до 0,03 мг/л (при средних – 0–0,013 мг/л). Исключение составляет р. Двина, где содержание азота нитритного достигает 0,6 мг/л. Зимой их величины изменяются в интервале от 0 до 0,33 мг/л (при средних – 0–0,045 мг/л). Повышенное содержание нитритного азота в воде рек в зимний период объясняется естественным замедлением окислительных процессов при низких температурах. В итоге, зимнее содержание данного компонента в реках севера в 1,3–11,3 раза превышает аналогичные показатели летне-осеннего и весеннего периодов.

Нитратные ионы среди других неорганических соединений азота наиболее устойчивы, а

главным потребителем их являются растения, поэтому в поверхностных водах для режима NO_3^- характерно уменьшение и часто полное его исчезновение в вегетационный период. Осенью же, в процессе отмирания растений и минерализации органических веществ, нитраты накапливаются и достигают максимума в зимний сезон.

Таким образом, на большинстве анализируемых ГГХП севера Русской равнины за 16-летний весьма противоречивый в социально-экономическом отношении период концентрация азота нитратного в весенний сезон изменяется от 0 до 0,65, при средних 0–0,11 мг/л, что в 2,9–6,9 раза меньше средних значений по МС (0,32–0,75 мг/л).

В летне-осенний сезон содержание азота нитратного в поверхностных водах варьирует от 0 до 0,38 мг/л, тогда как в атмосферных осадках – от 0,03 до 0,84 мг/л. Средние значения изменяются от 0 до 0,12 мг/л на ГГХП, что в 1,5–2,9 раза меньше средних значений теплого периода в атмосферных осадках (0,18–0,35 мг/л).

Наибольшие концентрации азота нитратного в поверхностных водах отмечаются в период зимней межени – 0 до 0,78 мг/л (при средних значениях – 0,05–0,35 мг/л) (рис. 2), что в 2,1–5,9 раза меньше содержания данного компонента в атмосферных осадках.

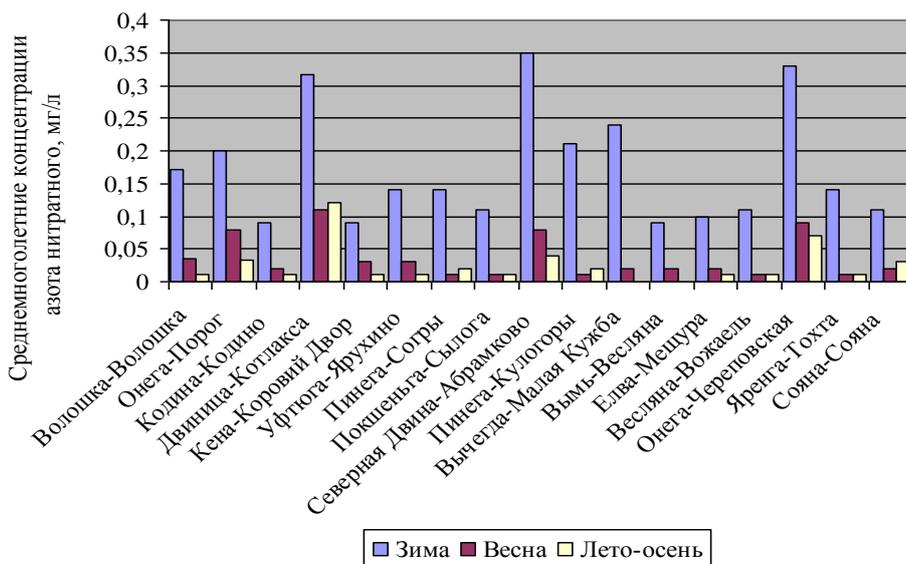


Рис. 2. Средние многолетние концентрации азота нитратного в различные гидрологические сезоны в поверхностных водах севера Русской равнины

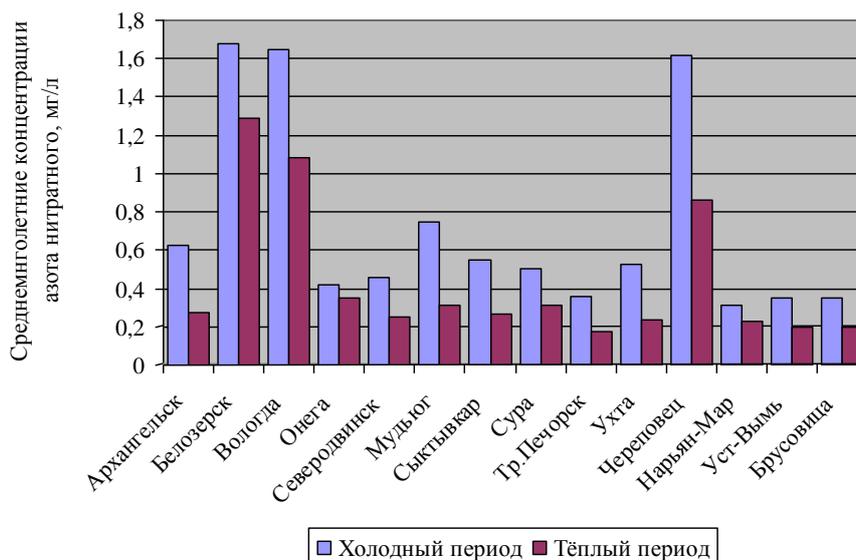


Рис. 3. Средние многолетние концентрации азота нитратного в различные сезоны в атмосферных осадках севера Русской равнины

Особняком стоит информация таких МС как Череповец, Белозерск и Вологда (рис. 3), где концентрации нитратного азота изменяются в пределах от 0,51 до 3,25 мг/л (при средних 1,62–1,68 мг/л) – в холодный период и от 0,17 до 3,56 мг/л (при средних 0,86–1,29 мг/л) – в теплый. Так, средние значения этих МС в 2,2–7,2 раза превышают аналогичные показатели остальных 11 МС севера Русской равнины.

В итоге средние значения концентрации азота нитратного в поверхностных водах в зимний сезон превышают подобные величины летне-осеннего и весеннего сезонов в 1,5–21 раз. Данный факт связан с тем, что именно в период зимней межени отмечается минимальное потребление азота нитратного растительностью. Кроме того – происходит распад накопившегося органического вещества, т.е. переход азота из органических форм в минеральные. Следует отметить, что по аналогии с поверхностными водами содержание азота нитратного в осадках холодного периода в среднем в 2 раза превышает аналогичные характеристики теплого сезона.

Для внутригодового распределения концентраций *суммарного азота* в речных водах характерен направленный рост его величин, начиная с весеннего сезона к зимнему. Так, наименьшие величины соответствуют первому из них, во время которого содержание азота неорганического изменяется от 0 до 1,59 мг/л (при средних 0,07–0,81 мг/л). Содержание суммарного азота в атмосфер-

ных осадках в холодный период изменяется от 0,05 до 3,84 мг/л (при среднем 0,67–1,76 мг/л) для большинства МС. А в итоге, его среднее содержание в осадках в 2,2–9,5 раза выше, чем в речной воде. Исключения из общего числа МС опять же приходится на Белозерск и Череповец, где концентрации варьируют от 1,40 до 5,31 мг/л (при средних 2,23–2,62 мг/л), что в 1,3–4,0 раза выше значений, отмеченных на остальных МС Северного управления Росгидромета.

Рост величин суммарного неорганического азота свойственен летне-осеннему периоду, когда концентрации в речных водах составляют 0–1,99 мг/л (при средних значениях – 0,06 до 0,72 мг/л). Содержание же суммарного азота в атмосферных осадках теплого периода изменяется от 0,14 до 4,21 мг/л (при среднем 0,52–1,36 мг/л) для большинства МС. А в итоге, среднее содержание суммарного азота в осадках превышает соответствующие значения в речной воде в 1,9–8,6 раза. И в данном случае из всех остальных МС выделяются Белозерск, Мудьюг и Череповец, для которых изменения происходят в диапазоне от 0,31 до 11,38 мг/л (при средних 1,94–2,39 мг/л), это в 1,4–4,6 раза превышает соответствующие средние значения на большинстве исследуемых МС (рис. 4).

Максимальные величины концентраций суммарного неорганического азота в речных водах свойственны зимнему периоду – от 0,001 до 3,69 мг/л (при средних значениях – 0,14–0,85 мг/л).

Содержание суммарного азота в атмосферных осадках в холодный сезон изменяется от 0,05 до 3,84 мг/л (при среднем 0,67–1,76 мг/л) для большинства МС. В итоге среднее его содержание в осадках в 2,1–4,7 раза выше, чем концентрации в речной воде. Исключением из всех МС вновь являются Белозерск и Череповец.

Обобщая, подчеркнем, что средние значения концентраций зимнего периода в речных водах превышают значения летне-осеннего и весеннего сезонов в 1,1–5,4 раза, что, естественно, отражается и на разнице концентраций суммарного неорганического азота в атмосферных осадках и поверхностных водах (рис. 5).

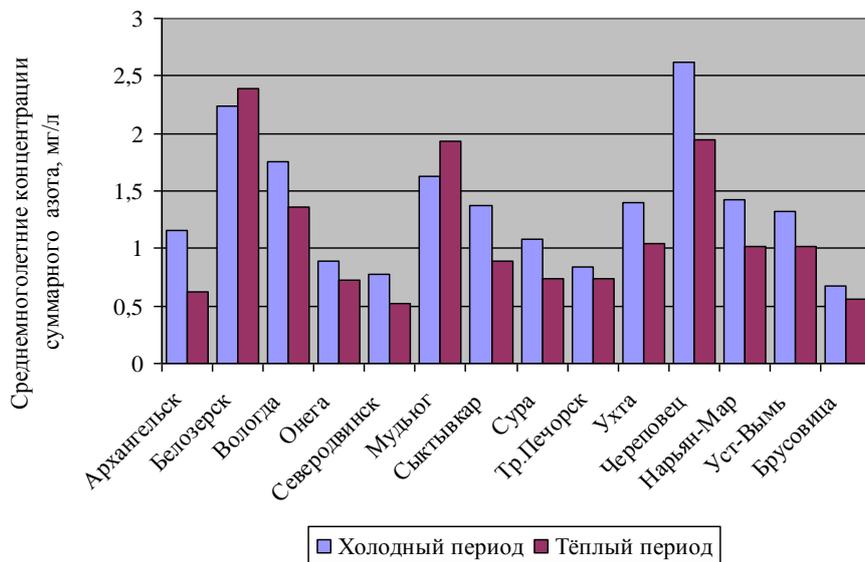


Рис. 4. Средние многолетние концентрации суммарного неорганического азота в различные сезоны в атмосферных осадках Русской равнины

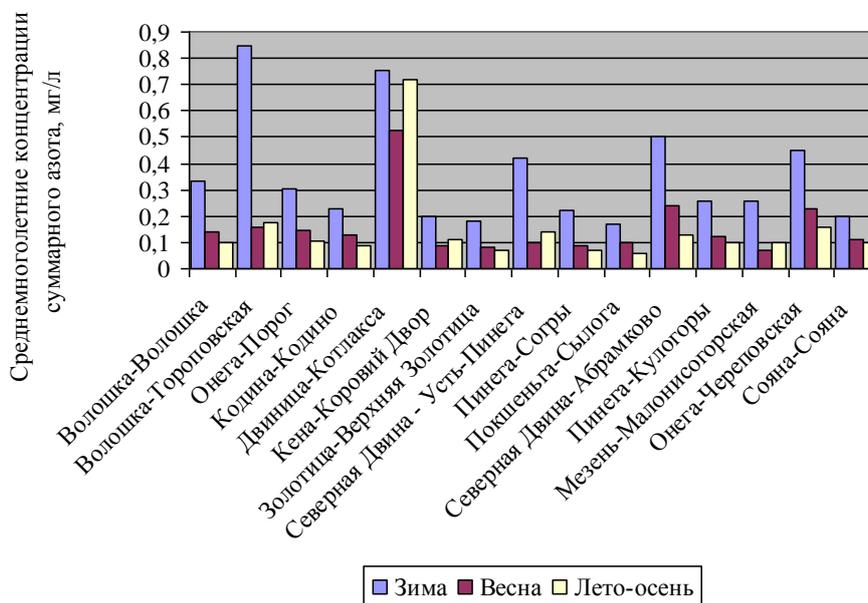


Рис. 5. Средние многолетние концентрации суммарного неорганического азота в различные гидрологические сезоны в поверхностных водах севера Русской равнины

Ниже производится сопоставление величин выпадений неорганического азота со стоком в речных водах по суммарному неорганическому азоту, а не по отдельным его формам, что обусловлено трудностями учета трансформации одних неорганических форм азота в другие. В итоге

выявлено превышение выпадений неорганического азота над количеством данного элемента, переносимого речным стоком по материалам большинства анализируемых МС и ГГХП. Последнее объясняется активным включением азота в биологические циклы, а также его накоплением в поч-

венном покрове. Расчеты показывают, что в течение года включение суммарного неорганического азота в биологические циклы, а также аккумуляция его в почве превышают на территории севера Русской равнины годовой речной сток азота в 1,8–32,1 раза (средний показатель для данного региона составляет 9,5 раза). При рассмотрении же сезонных показателей выявляется существенная разница между стоком неорганического азота и вовлечением его в биогеохимические процессы на протяжении теплого и холодного сезонов. А именно, количество неорганического азота, вовлеченного в биоциклы, превышает речной сток азота в теплый период в 1,9–66,6 раза (при среднем – в 24,9 раз), в холодный же – в 1,4–15,8 раз (при среднем – в 4,9 раза). Различия в показателях теплого и холодного сезонов позволяют сделать вывод об определяющей роли растительности, ко-

торая интенсивно продуцирует, а соответственно, и поглощает азот, как известно, летом. В итоге наши расчеты подтверждают большую роль биологического круговорота в балансе такого биогенного элемента как азот. Анализ территориальной изменчивости выпадений различных форм неорганического азота на севере Русской равнины показал, что здесь существует значительная дифференциация величин.

Для аммонийной формы азота величины показателя выпадений на большинстве МС изменяются в пределах 11,6–1227,2 кг/км² (при средних 117,6–459,6 кг/км²) (табл. 1). Что касается МС Мудьюг и Череповец, то содержание данной формы азота у них колеблется в интервале от 52,4 до 2170,4 кг/км² (при средних 473,6–679,6 кг/км²), что в 1,5–4 раза превышает аналогичные величины всех других метеостанций.

Таблица 1

Годовые выпадения аммонийной, нитратной и суммарной форм неорганического азота на метеостанциях севера ЕТР за период 1985–2000 гг.

| Посты | Годовые выпадения (кг/км ²) | | |
|--------------|---|-----------------------------|-------------------------------|
| | Азот аммонийный | Азот нитратный | Суммарный неорганический азот |
| Архангельск | <u>126,4-449,1</u> 243,4 | <u>96,6-543,7</u> 222,9 | <u>317,4-847,9</u> 466,3 |
| Белозерск | <u>39,2-1227,2</u> 329,3 | <u>362,5-1234,4</u> 704 | <u>539,8-2461,6</u> 1033,3 |
| Вологда | <u>11,6-640,5</u> 117,6 | <u>515,5-846,1</u> 647,2 | <u>551,1-1438,7</u> 764,8 |
| Онега | <u>70,3-790,3</u> 276,0 | <u>132,9-383,6</u> 213,1 | <u>228,4-1173,9</u> 489,1 |
| Северодвинск | <u>30,9-194,2</u> 135,5 | <u>71,1-288,6</u> 161,8 | <u>234,1-425,1</u> 297,4 |
| Мудьюг | <u>292,3-2170,4</u> 679,6 | <u>111,2-318,0</u> 222,4 | <u>527,3-2409,1</u> 902,1 |
| Сыктывкар | <u>279,9-497,0</u> 404,6 | <u>116,3-251,1</u> 177,4 | <u>442,1-717,2</u> 582 |
| Сура | <u>109-530,8</u> 242,3 | <u>91,9-390,1</u> 204,5 | <u>206,3-704,8</u> 446,8 |
| Тр. Печорск | <u>96,5-357,4</u> 245,6 | <u>32,7-203,2</u> 130 | <u>207,6-462,9</u> 375,7 |
| Ухта | <u>171,4-882,8</u> 491,5 | <u>63,8-230,5</u> 144,8 | <u>235,2-1113,2</u> 636,3 |
| Череповец | <u>52,4-1673,1</u> 473,6 | <u>234,1-983</u> 583,7 | <u>700,2-1975,8</u> 1057,3 |
| Нарьян-Мар | <u>214,8-1206,7</u> 442,3 | <u>21,8-266,6</u> 122 | <u>250,1-956</u> 544,8 |
| Усть-Вымь | <u>228,1-1084,2</u> 459,6 | <u>22,8-338,8</u> 133,5 | <u>261,2-1274,2</u> 616 |
| Брусовица | <u>43,8-641,8</u> 293,8 | <u>96,7-239,8</u> 163,2 | <u>205,6-801</u> 457 |

В числителе – диапазон изменений выпадений, в знаменателе – среднее значение за период 1985–2000 гг.

Для большинства МС показатель выпадения азота нитратного изменялся от 21,8 до 543,7 кг/км², а величина среднего значения варьировала в пределах 122,0–222,9 кг/км². Исключение составили все те же МС: Белозерск, Вологда и Череповец, где показатели данной формы изменяются от 234,1 до 1234,4 кг/км² (при средних 583,7–704,0 кг/км²) (табл. 1). В итоге средние многолетние выпадения нитратного азота здесь превысили аналогичные значения, свойственные остальным МС севера, в 3,2–4,8 раза.

Изменения значений выпадения суммарного азота для большинства МС региона происходило в пределах 205,6–1438,7 кг/км², а величины средних значений – в интервале от 297,4 до 764,8 кг/км² (табл. 1). Средние же многолетние выпадения суммарного азота на МС Мудьюг, Белозерск и Череповец (527,3–2461,6 кг/км² при средних 902,1–1057,3 кг/км²) опять-таки превысили средние значения большинства МС в 1,2–3,6 раза.

Все эти три МС расположены на юге и юго-западе региона, т.е. там, где сфокусирована основная площадь, как пашни, так и в целом сельскохозяйугодий. Например, в Вологодской области последние составляют более 40% территории. Кроме того, г. Череповец, в котором расположены такие промышленные гиганты, как ОАО «Северсталь» и АП «Севергазпром» – крупнейшие в РФ загрязнители воздушного бассейна в своих отраслях, а также Череповецкая ГРЭС и предприятия химической промышленности – ОАО «Азот» и ОАО «Аммо-

фос», входит в число урбозкосистем с наиболее высоким валовым выбросом ЗВ в атмосферу. Естественно, последнее является причиной высоких показателей выпадений всех форм неорганического азота с осадками, оказывающими воздействие на смежные территории.

Анализ временных рядов (1985–2000 гг.) концентраций и атмосферных выпадений азота аммонийного, нитратного и суммарного показывает наличие двух периодов, четко различающихся по значениям рассматриваемых показателей для большинства МС. Общая тенденция выражается в снижении концентраций и выпадений неорганического азота на севере Русской равнины, начиная с 1994 г. Следует особо подчеркнуть, что для различных форм неорганического азота изменения величин по периодам были различны. Так, для азота аммонийного (рис. 6) и суммарного периода 1985–1993 гг. свойственны более высокие средние показатели выпадений для большинства МС, однако, начиная с 1994 г. прослеживается снижение выпадений. Так, средние показатели выпадений азота аммонийного при сопоставлении этих периодов снизились в 1,5–3,5 раза, суммарного – в 1,1–7,9 раза. Исключение составляют лишь МС Нарьян-Мар и Усть-Вымь, где прослеживается тенденция к некоторому повышению значений выпадений как азота аммонийного, так и суммарного. Последние возросли при сравнении этих двух периодов в 1,2–1,3 раза.

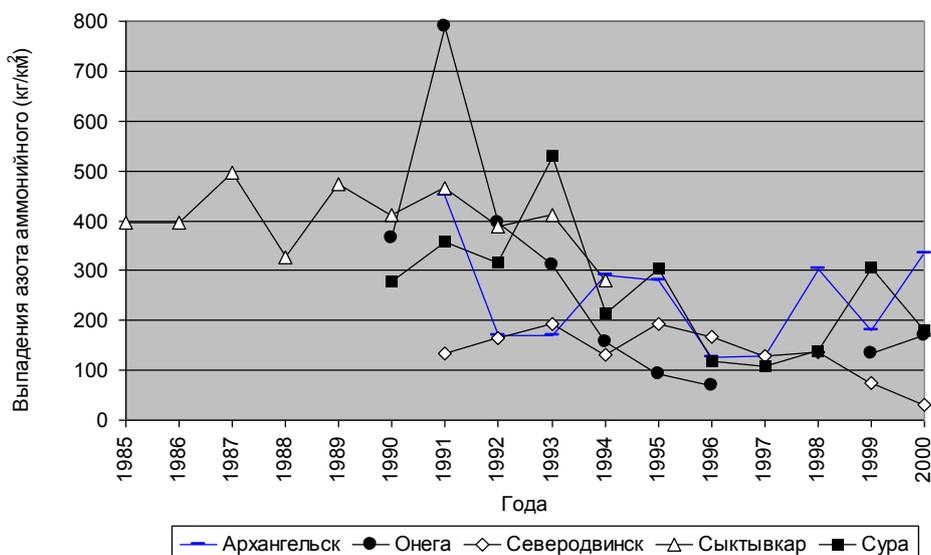


Рис. 6. Многолетняя изменчивость показателя годовых выпадений азота аммонийного на метеостанциях севера Русской равнины

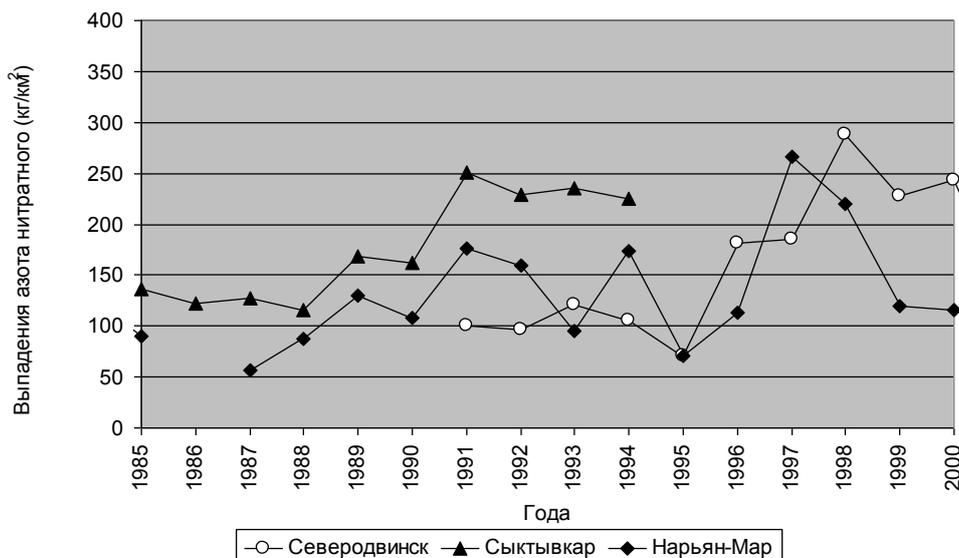


Рис. 7. Многолетняя изменчивость показателя годовых выпадений азота нитратного на метеостанциях севера Русской равнины

Для нитратной формы азота прослеживается обратная тенденция в изменении величин для большинства МС. Период 1985–1993 гг. характеризуется более низкими средними показателями выпадений, тогда как с 1994 по 2000 гг. происходит рост показателей для большинства МС в 1,1–3,4 раза (рис. 7). И вновь, как и в предыдущем случае, МС Усть-Вымь выпадает из общей временной тенденции: именно здесь в период 1985–1993 гг. зафиксированы более высокие средние показатели выпадений нитратного азота, тогда как в 1994–2000 гг. происходит снижение в 1,2 раза.

В итоге на большинстве МС севера Русской равнины выявлена четкая тенденция снижения выпадений аммонийного и суммарного азота и обратная тенденция для нитратного азота за 1985–2000 гг. Схожие тенденции многолетних изменений содержания и стока различных форм неорганического азота свойственны и поверхностным водам региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко В.Н., Карабань Р.Т., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Баланс серы и азота в атмосфере для территории СССР и нагрузки на лесные экосистемы и почвы // Проблемы мониторинга и охраны окружающей среды: Сборник статей. Л., 1989. 389с.
2. Ковда В.А. Современное состояние круговорота азота в биосфере // Круговорот и баланс азота в системе почва – удобрение – растение – вода: Сборник статей. М., 1979. С. 5–8.
3. Кудеяров В.Н. Об интенсификации вовлечения азота в его биогеохимический цикл // Круговорот и баланс азота в системе почва – удобрение – растение – вода: Сборник статей. М., 1979. С. 280–284.
4. Оношко М.П. Азот и его минеральные формы в ландшафтах Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1990. 174 с.
5. Сороковикова Л.М., Сишочкович В.Н., Ходжер Т.В. и др. Поступление биогенных элементов и органических веществ в оз. Байкал с речными водами и атмосферными осадками // Метеорология и гидрология. 2001. № 4. С. 78–85.

Special features of precipitation and drain of inorganic nitrogen on the north of Russian plain

V.A. Fedorova, N.P. Torsuev

Disbalances of biogeochemical cycle of nitrogen as a result of intensive economic activities are considered in article. The information on concentration of inorganic nitrogen various forms (1985–2000 years) gathered on 27 hydrological-hydrochemical posts and 14 meteorological stations located in the north of Russian plain is put in a work basis. The analysis of intraannual changes of ammonium, nitrate, nitrite and total nitrogen maintenance in superficial waters and an atmospheric precipitation is carried out. Excess of inorganic nitrogen losses over quantity of the given element transferred by a river drain in 1,8–32,1 times (the average index for the given region makes 9,5 times) is revealed, that explains by active inclusion of nitrogen in biological cycles, and also its accumulation in a soil cover. The accurate tendency of decrease in ammonium and total nitrogen losses and drain and growth for nitrate form for 1985–2000 periods by long-term changes analysis has revealed. Large anomalies in precipitations of all forms of nitrogen in Cherepovets, Vologda, Mud'ug weather stations (Arkhangelsk, Severodvinsk, Novodvinsk cities) are peculiar.

Keywords: Inorganic nitrogen; ammonium nitrogen; total nitrogen; a biogeochemical cycle of nitrogen; atmospheric precipitation; ionic flow; concentration; precipitations module.

Фёдорова Виктория Алексеевна – к.г.н., доц. кафедры ландшафтной экологии Казанского государственного университета, fva_14@mail.ru

Торсуев Николай Павлович – д.г.н., проф. кафедры ландшафтной экологии Казанского государственного университета