# Внутренняя нагрузка на Чудско-Псковскую озерную систему: натурные исследования и модельные оценки

*Н.В. Игнатьева*

**Институт озероведения РАН**
**г. Санкт-Петербург, Россия**

**Внутренняя биогенная нагрузка** формируется за счет поступления фосфор- и азотсодержащих соединений из донных отложений в водную массу. Часть взвешенного вещества, осевшего на дно водоема в ходе седиментации, безвозвратно захоранивается в осадке, а другая часть поступает обратно в водную массу, создавая внутреннюю нагрузку на водоем. Таким образом, внутренняя нагрузка является вторичной по отношению к внешней нагрузке.

Роль донных отложений в круговороте биогенных элементов в озерной экосистеме определяется их способностью удерживать или быть источником фосфора и азота по отношению к водной массе.

**Основные потоки веществ в пограничной зоне «вода – дно»:**

- седиментация на поверхность дна (S);
- захоронение в толще осадка (B);
- поступление из донных отложений в водную массу (J),

создающее внутреннюю нагрузку на водоем.

# Основные механизмы поступления химических веществ из донных отложений в водную массу

Диффузионный перенос:

- с поверхности осадка,
- из толщи отложений.

Конвективный перенос:

- ветровое, в том числе, волновое взмучивание,
- антропогенное взмучивание,
- биотурбация,
- газоотделение со дна в анаэробных условиях,
- влияние жизнедеятельности макрофитов, бентических водорослей и придонных рыб.

Конвективно-диффузионный перенос

# Основные подходы к оценке внутренней нагрузки на водные объекты

Существует два основных подхода к оценке внутренней биогенной нагрузки:

- экспериментальная оценка потока через границу раздела «вода – дно» на основе лабораторных или натурных экспериментов;
- балансовые расчеты (для всего водоема, расчетного элемента, активного слоя донных отложений, и т.д.).

В Институте озероведения РАН (ИНОЗ РАН) были использованы две расчетных схемы оценки внутренней биогенной нагрузки:

- Метод оценки внутренней биогенной нагрузки, разработанный в ИНОЗ РАН, основанный на расчете биогенного баланса в пограничной зоне «вода-дно» в точке измерения на основе данных натурных наблюдений;
- 3D модель, основанная на гидродинамической модели внутреннего моря, разработанной в ИВМ РАН, дополненной экосистемным блоком и блоком формирования внутренней нагрузки за счет сдвигового и волнового взмучивания донных отложений.

# Схема расчета внутренней нагрузки в соответствии с методом, разработанным в ИНОЗ РАН

Поток фосфора и азота из донных отложений в воду (J, г P(N) $м^{-2}$ $год^{-1}$) оценивается как разность между потоком седиментации на поверхность донных отложений (S) и потоком захоронения в толще осадка (B):

$$J = S - B$$

Расчет потоков седиментации S и захоронения B выполнялся по формуле:

$$S \text{ или } B = \frac{TP(TN)_x \times V_{oc} \times d_s \times (1-p) \times 10^3}{365}$$

где $TP(TN)_x$ – содержание общего фосфора (азота) на глубине x в осадке, мг P(N) $г^{-1}$ (сухого осадка) (x = 0 см при расчете потока седиментации; x = 10 ÷ 20 см (нижняя граница «активного» слоя) при расчете потока захоронения); $V_{oc}$ – скорость осадконакопления, мм $год^{-1}$; $d_s$ – удельная масса сухого осадка, г $см^{-3}$; p – пористость осадка.

Скорость осадконакопления тонкодисперсных осадков составляет в Чудско-Псковском озере от 4 до 8,3 мм $год^{-1}$ [Kangur et al., 2007; Punning, Kapanen, 2009]. Для грубодисперсных осадков $V_{oc.} = 2,5$ мм $год^{-1}$

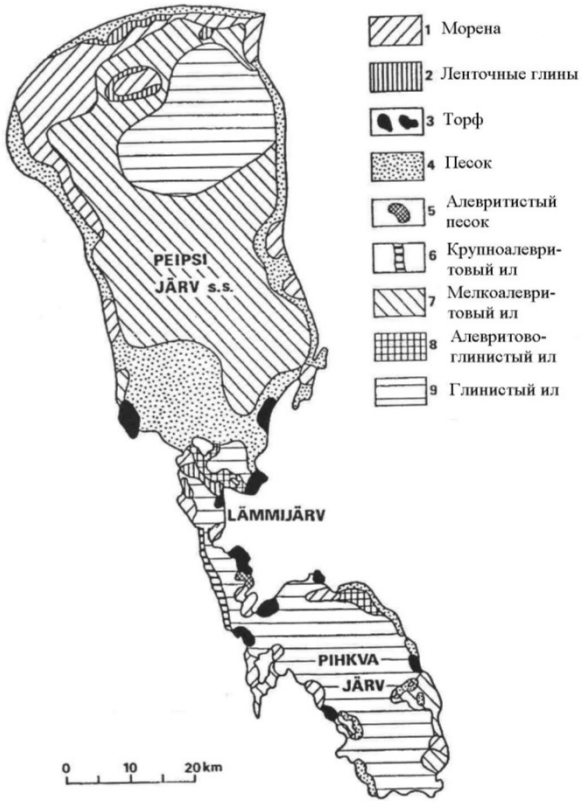
Оценка **внутренней фосфорной нагрузки** на озеро была дана на основе данных натурных наблюдений, выполненных в 2008, 2013 и 2017 г. на мониторинговых станциях Псковского отделения ГосНИОРХ, расположенных на российской части Чудско-Псковского озера. **Внутренняя азотная нагрузка** впервые была оценена в 2017 г.

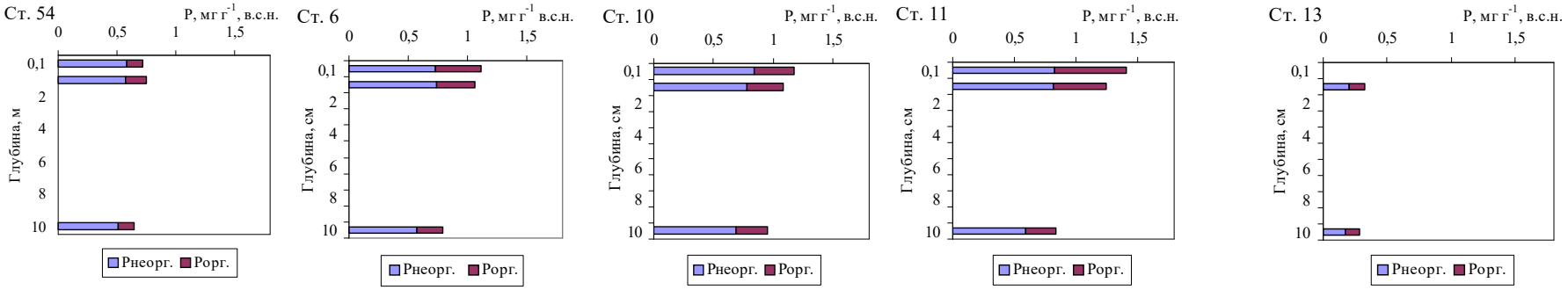
В 2013 и 2017 гг. пробы отбирались ежемесячно в летне-осенний период

## В ходе натурных исследований на водоеме определялись следующие характеристики:

| Придонная вода | Твердая фаза донных отложений | Поровый раствор | Натуральный осадок |
|---|---|---|---|
| неорганический фосфор (IP) | неорганический фосфор (IP) | неорганический фосфор (IP) | удельная масса сухого осадка ($d_s$) |
| $NH_4^+$ | общий фосфор (TP) | $NH_4^+$ | пористость (p) |
| $NO_3^-$ | общий азот (TN) | $NO_3^-$ | влажность (W) |
| взвешенное вещество | | | |
| $O_2$ | | | |
| pH | | | |

# Расположение станций отбора проб на сети Псковского отделения ФГБНУ ГОСНИОРХ и пространственное распределение типов донных отложений в Чудско-Псковской озерной системе

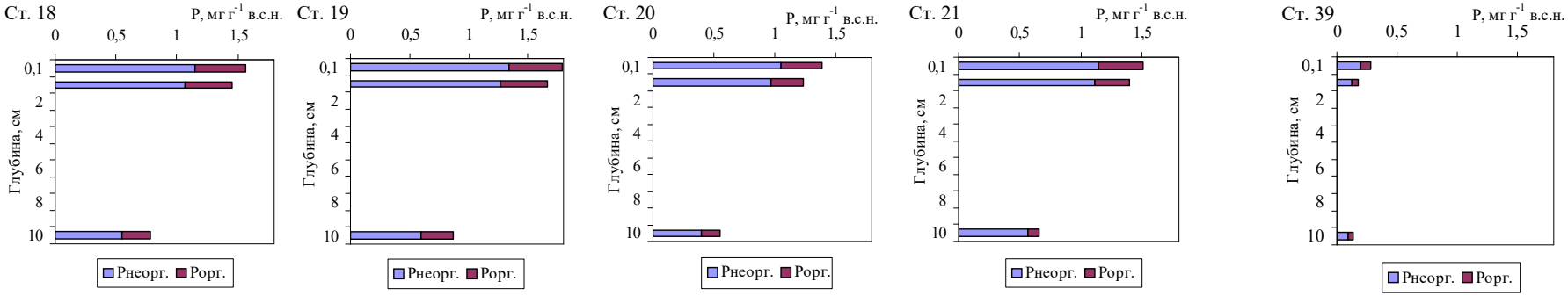





глинистые илы

алеврит

## Чудское озеро




глинистые илы

алеврит

## Псковское озеро

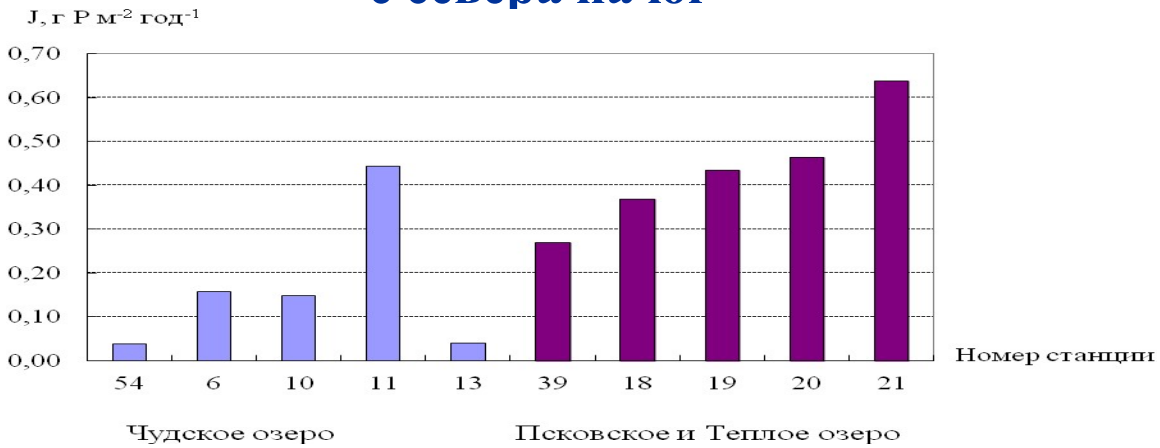
# Вертикальное распределение форм фосфора (неорганического и органического) в твердой фазе донных отложений

# Седиментация (B), захоронение (S), поступление из донных отложений (J) и удерживающая способность донных отложений (B/S) по отношению к фосфору и азоту (2017 г.)

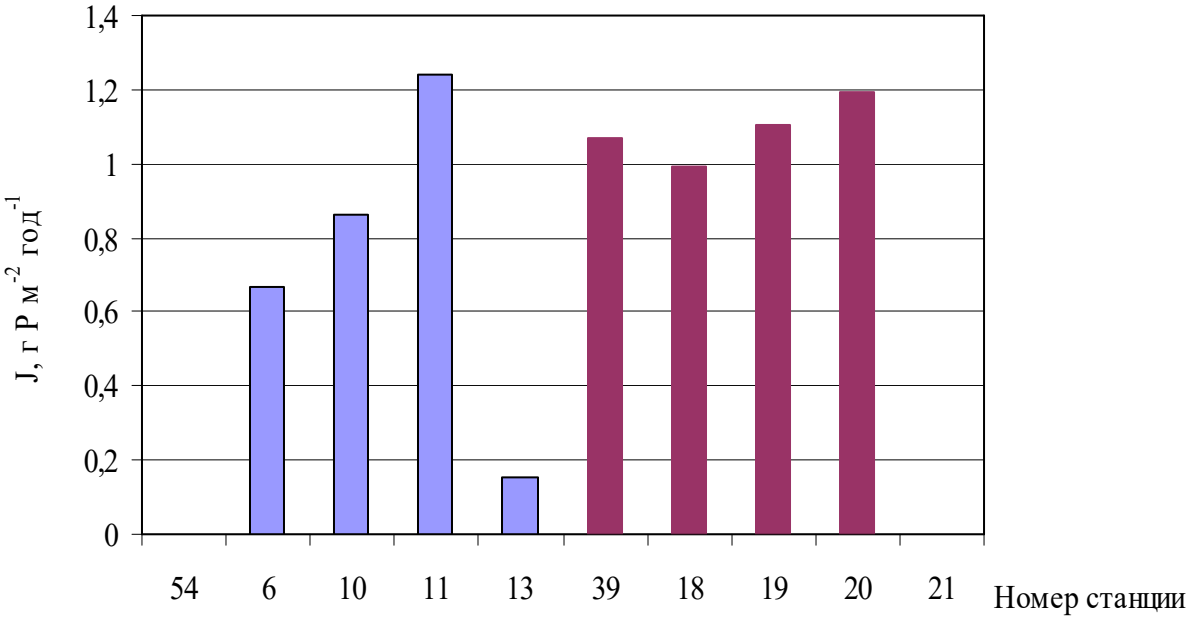
| Фосфор | Седиментация (S) | | Захоронение (B) | | B/S, % | Поступление (J) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | г P $м^{-2}$ $год^{-1}$ | т $год^{-1}$ | г P $м^{-2}$ $год^{-1}$ | т $год^{-1}$ | | г P $м^{-2}$ $год^{-1}$ | т $год^{-1}$ |
| Чудское озеро | 0,87 | **2049** | 0,57 | **1354** | 66 | 0,29 | **695** |
| Псковское и Теплое озеро | 0,80 | **767** | 0,41 | **389** | 51 | 0,39 | **378** |
| Всё озеро | 0,85 | **2816** | 0,53 | **1743** | 62 | 0,32 | **1073** |

| Азот | Седиментация (S) | | Захоронение (B) | | B/S, % | Поступление (J) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | г N $м^{-2}$ $год^{-1}$ | т $год^{-1}$ | г N $м^{-2}$ $год^{-1}$ | т $год^{-1}$ | | г N $м^{-2}$ $год^{-1}$ | т $год^{-1}$ |
| Чудское озеро | 14,4 | **34015** | 11,5 | **27252** | 80 | 2,6 | **6763** |
| Псковское и Теплое озеро | 9,1 | **8689** | 6,0 | **5764** | 67 | 3,1 | **3028** |
| Всё озеро | 12,9 | **42704** | 9,9 | **33016** | 77 | 3,0 | **9790** |

# Распределение величин потоков фосфора из донных отложений озера, оцененных в 2008 и 2017 гг., вдоль условного продольного разреза с севера на юг




**2008 г.**




**2017 г.**

## Диффузионные потоки ($J_{диф.}$) фосфора из толщи донных отложений Чудско-Псковского озера 19 – 21.08.2008

| Район | $J_{диф.}$, мг Р $м^{-2}$ $сут.^{-1}$ | $J_{диф.}/J$, % (среднее) |
|---|---|---|
| Чудское оз. | -0.002 – 0.138 | 4 |
| Псковское оз. | 0.011 – 0.051 | 13 |
| Дельта р. Великой | 0.008 | 0.5 |

## Основные транспортные механизмами поступления фосфора со дна Чудско-Псковского озера:

- конвективный перенос;
- диффузия непосредственно с поверхности осадка;
- конвективно-диффузионный механизм, действующий в период осеннего охлаждения. По результатам выполненной оценки, при реализации **конвективно–диффузионного механизма** тепломассообмена из донных отложений Псковского озера может поступать до **50 тонн** растворенного неорганического фосфора, что составляет **10 – 15 % суммарной внутренней нагрузки на озеро**.

# Основные результаты оценки внутренней фосфорной нагрузки на Чудско-Псковскую озерную систему по данным 2017 г.

- В течение года на дно Чудско-Псковского озера оседает **2816** тонн фосфора, из них **2049** тонн в Чудском озере и **767** тонн в Псковском.
- Удерживающая способность осадков по отношению к фосфору снижается с повышением трофического статуса водоема. В среднем в озере захоранивается 62 % седиментировавшего фосфора: в Чудском озере – 66 %, в Псковском – 51 %.
- Из донных отложений в воду Чудско-Псковского озера поступает **1073** тонны фосфора, из них **695** тонн в Чудское озеро и **378** тонн в Псковское озеро. Это и есть внутренняя фосфорная нагрузка.
- Средняя плотность потока фосфора из донных отложений составила 0,32 г Р $м^{-2}$ $год^{-1}$, 0,29 и 0,39 г Р $м^{-2}$ $год^{-1}$ соответственно для Чудского и Псковского озер.
- По сравнению с 2008 г. внутренняя фосфорная нагрузка на Чудско-Псковскую озерную систему возросла в **1,6** раза, главным образом, за счет увеличения потока фосфора со дна Чудского озера.
- В настоящее время внутренняя фосфорная нагрузка превышает внешнюю нагрузку более, чем в 2 раза.

# Основные результаты оценки внутренней азотной нагрузки на Чудско-Псковскую озерную систему по данным 2017 г.

- В течение года на дно Чудско-Псковского озера оседает **42704** тонны азота, из них **34015** тонн в Чудском озере, **8689** тонн – в Псковском озере.
- Как и в случае фосфора, удерживающая способность осадков по отношению к азоту снижается с повышением трофического статуса водоема. Для всего озера она составляет 77 %, 80 и 67 % соответственно для Чудского и Псковского озер.
- Из донных отложений в озеро поступает **9790** тонн азота, из них **6763** тонны в Чудское озеро и **3028** тонн в Псковское.
- Средняя плотность потока азота со дна Псковского озера превышает таковую для Чудского озера менее существенно, чем для фосфора (3,1 и 2,6 г N $м^{-2}$ $год^{-1}$ соответственно).
- Динамику внутренней азотной нагрузки оценить невозможно, т.к. в предшествующих исследованиях измерения содержания азота в донных отложениях не проводились.

Спасибо за внимание !