

Экологический мониторинг. Часть VIII.

Современные проблемы мониторинга пресноводных экосистем

Глава XI

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКОСИСТЕМАХ НЕСТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ (на примере Невской губы Финского залива)

Подгорный К.А.

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Фундаментальный вопрос:

**какова роль живого вещества
водных экосистем в
осуществлении процессов
трансформации и круговорота
соединений важнейших биогенных
элементов (C, N, P, Si)**

В данном исследовании разработана имитационная математическая модель, которая может использоваться для изучения экологических условий функционирования экосистем нестратифицированных водоемов

**В полном объеме (то есть с применением
всех заложенных в имитационной модели
возможностей моделирования
формирования структуры течений, расчета
тепловых потоков и полей температуры
воды, исследования процессов
биотрансформации форм азота, фосфора и
динамики растворенного в воде кислорода)
модельные исследования были выполнены
для экосистемы Невской губы
Финского залива**

Основные особенности Невской губы



Основные особенности Невской губы

- на формирование ее водной массы значительное влияние оказывает Ладожское озеро, воды которого со стоком р. Невы поступают в Невскую губу в объеме ~2400–2500 куб. м/с;
- кратность годового водообмена за счет притока речных вод равна 66, что обеспечивает обновление воды в ней в среднем за 5–6 суток, а в центральной транзитной зоне почти вдвое быстрее;
- Невская губа – мелководный водоем с преобладающими глубинами 3–5 м, интенсивным ветровым перемешиванием водных масс, разнообразными внутриводоемными процессами биогидрохимической трансформации;

Основные особенности Невской губы

- велико влияние Балтийского моря, которое сказывается на изменении солености и температуры воды, изменениях уровня воды и структуры биологических сообществ;
- Невская губа - район с высоким уровнем техногенной нагрузки на окружающую среду;
- на экосистему Невской губы оказывает влияние строящийся комплекс водозащитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений;
- чрезвычайно высока пространственно-временная изменчивость качества воды.

Такие модели не описывают переходные состояния водных экосистем, в них нет корректного описания трансформации биогенных веществ, поскольку водная экосистема – это полисубстратная система. Именно поэтому в указанных работах не удалось решить задачи по исследованию внутри- и межгодовой динамики и балансов компонентов экосистемы.

Особенно остро стоит проблема изучения циклов конкретных биогенных элементов в Невской губе

ИМЕЮЩИЙСЯ ОПЫТ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

- ✓ существующие модельные разработки не объединены ни общей задачей, ни общей целью, а решают свои узконаправленные задачи;**
- ✓ оценок воздействий на экосистему акватории в этих моделях, как правило, нет;**
- ✓ совершенно нет исследований, относящихся к моделированию внутри- и межгодовой динамики наиболее важных компонентов экосистемы Невской губы.**

Цели работы

- на основе всестороннего системного анализа данных наблюдений и сведений, опубликованных в литературных источниках, разработать имитационную, пространственно-неоднородную модель экосистемы Невской губы, которая:
 - ✓ учитывает основные взаимодействия как природных, так и антропогенных факторов, их совместное влияние на водную экосистему;
 - ✓ отражает важнейшие пути трансформации биогенных элементов (азота и фосфора) и особенности динамики растворенного в воде кислорода;

Цели работы

- **путем численных экспериментов исследовать наиболее важные закономерности биотрансформации и круговорота соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода, количественно оценить процессы, определяющие продукционный потенциал Невской губы.**

Задачи исследования

- обобщить имеющуюся информацию о состоянии экосистемы Невской губы Финского залива и современных тенденциях ее изменения, обеспечить модель входными гидрологическими, гидрометеорологическими, гидрохимическими и гидробиологическими данными, провести анализ данных наблюдений с использованием метода главных компонент;

Задачи исследования

- выделить **основные функциональные блоки** пространственно-неоднородной имитационной математической модели для исследования процессов биотрансформации форм азота, фосфора и динамики растворенного кислорода в водах Невской губы, **разработать их структуру, осуществить алгоритмическую и программную их реализацию, обеспечить согласование блоков между собой и с имеющимися данными наблюдений;**

Задачи исследования

- **путем численных экспериментов исследовать:**
 - ✓ **наиболее важные закономерности трансформации и круговорота соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода,**
 - ✓ **оценить адекватность модели,**
 - ✓ **рассчитать продукционный потенциал экосистемы Невской губы;**

Задачи исследования

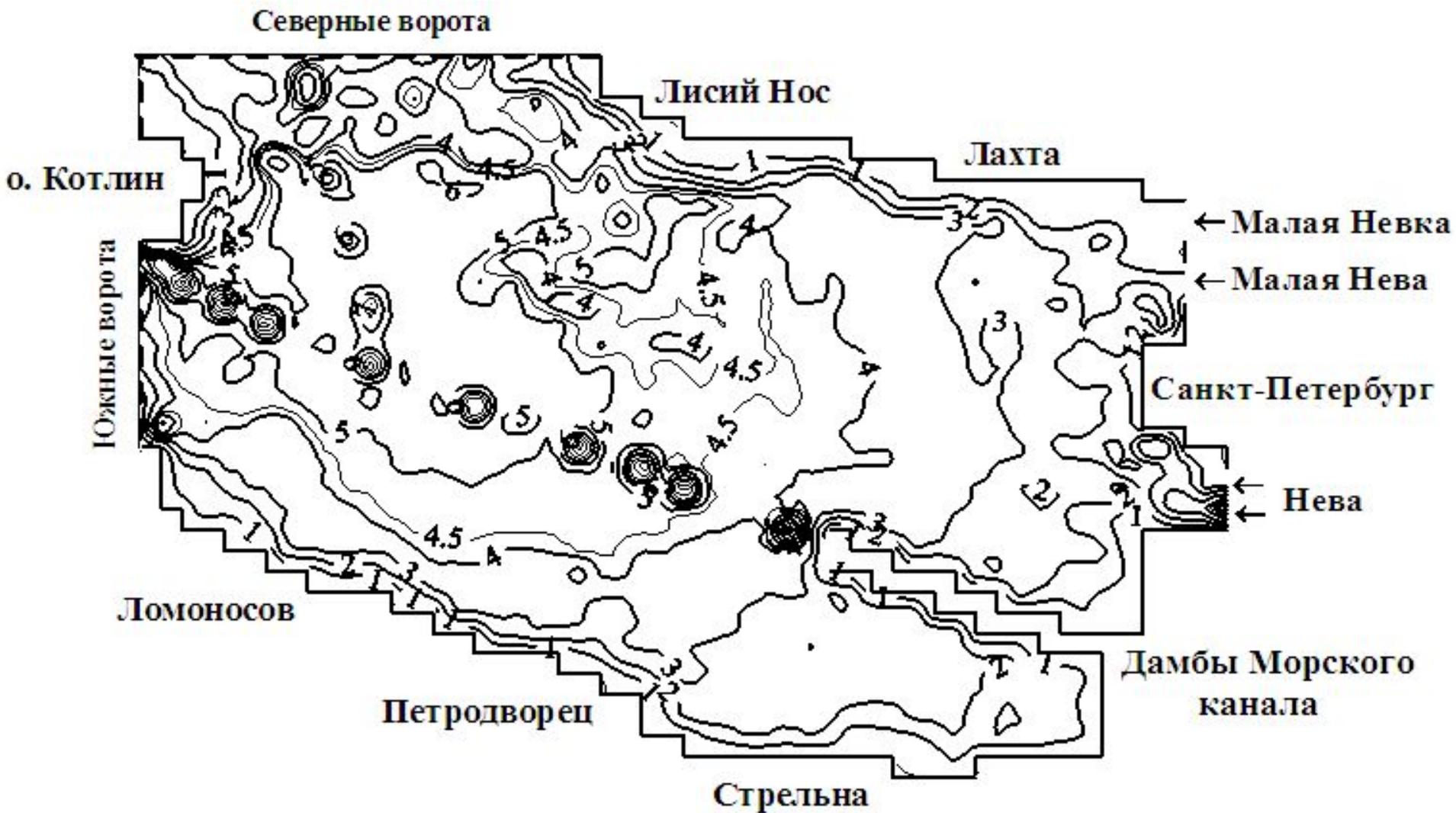
- ✓ **выявить основные особенности внутригодовой и межгодовой изменчивости концентраций соединений азота и фосфора;**
- ✓ **исследовать среднегодовую динамику балансов биогенных веществ в экосистеме Невской губы.**

Общее описание структуры имитационной модели

Основные блоки модели

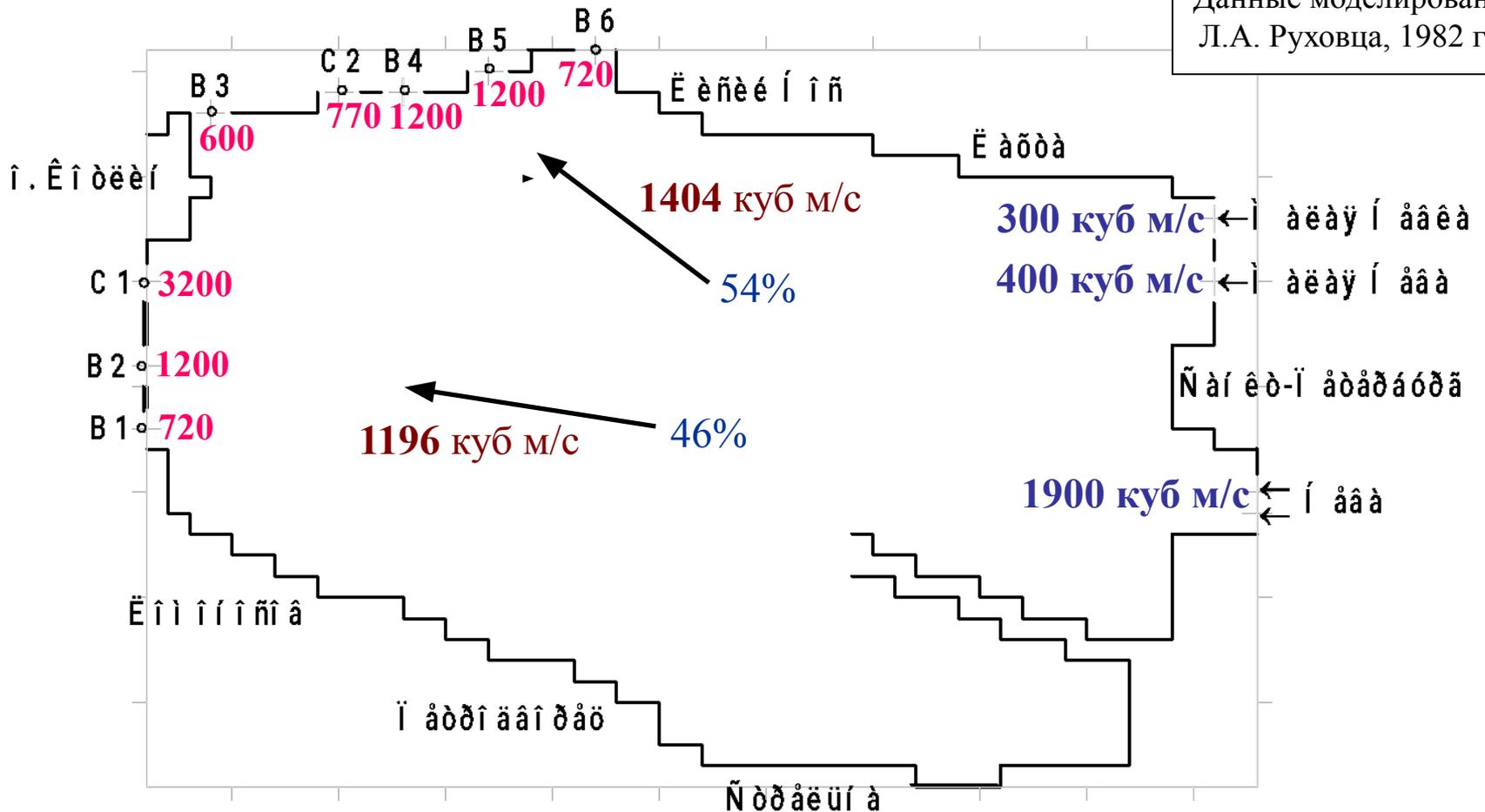
1. **гидродинамический** - для расчета нестационарной, осредненной по вертикали структуры течений в водоемах;
2. **гидротермодинамический** - для расчета фотопериода, составляющих теплового баланса и температурного режима водоема;
3. **гидрооптический** - для расчета оптических характеристик водной толщи;
4. **блок для описания процессов биотрансформации соединений азота и фосфора в водоеме и динамики растворенного в воде кислорода;**
5. **блок для расчета времени оборота и потоков вещества между выделенными модельными компонентами экосистемы;**
6. **блок для выполнения процедуры оценивания параметров имитационной модели.**

Распределение глубин в пределах расчетной области



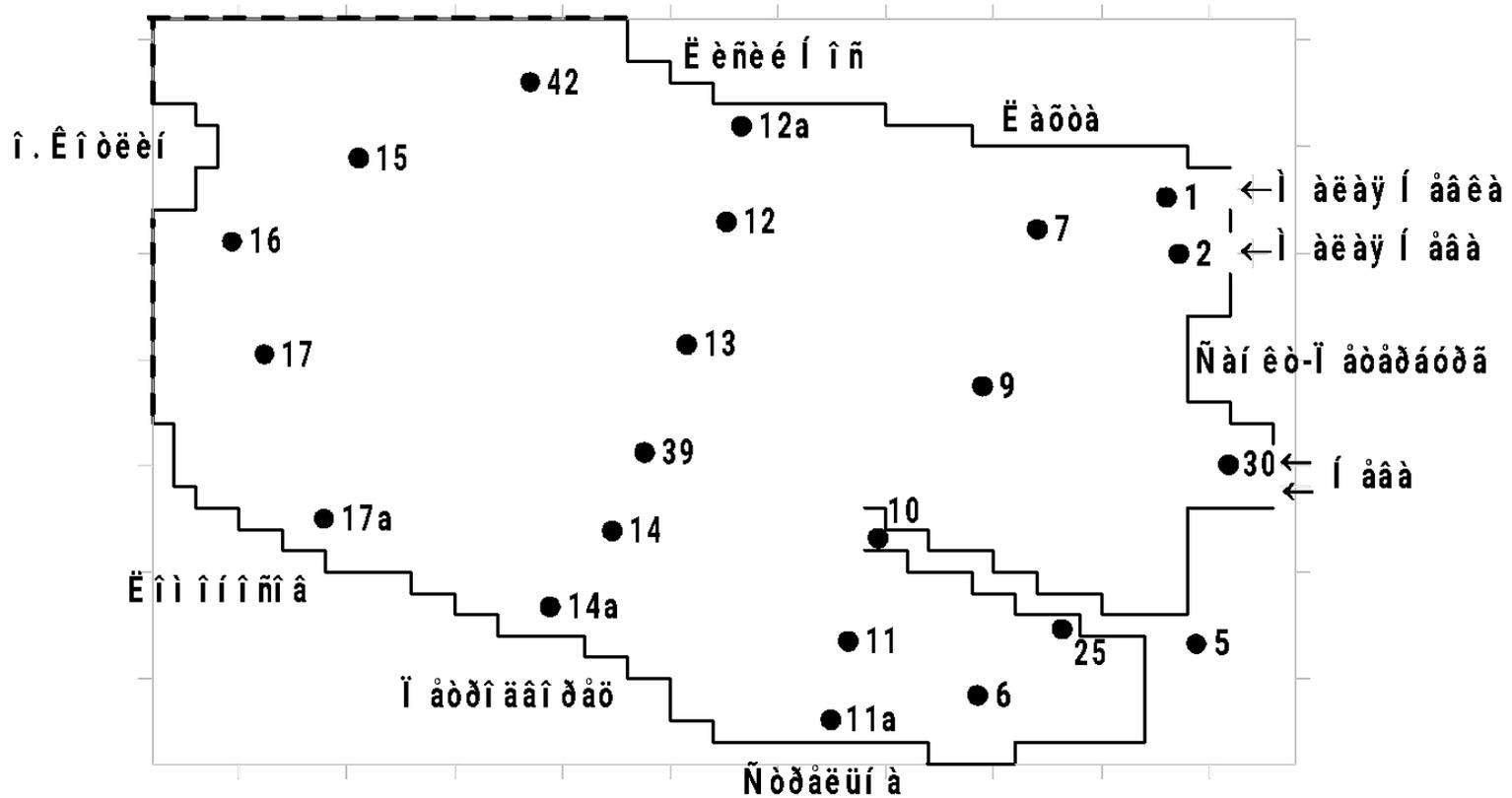
Проектные условия

Данные моделирования
Л.А. Руховца, 1982 год

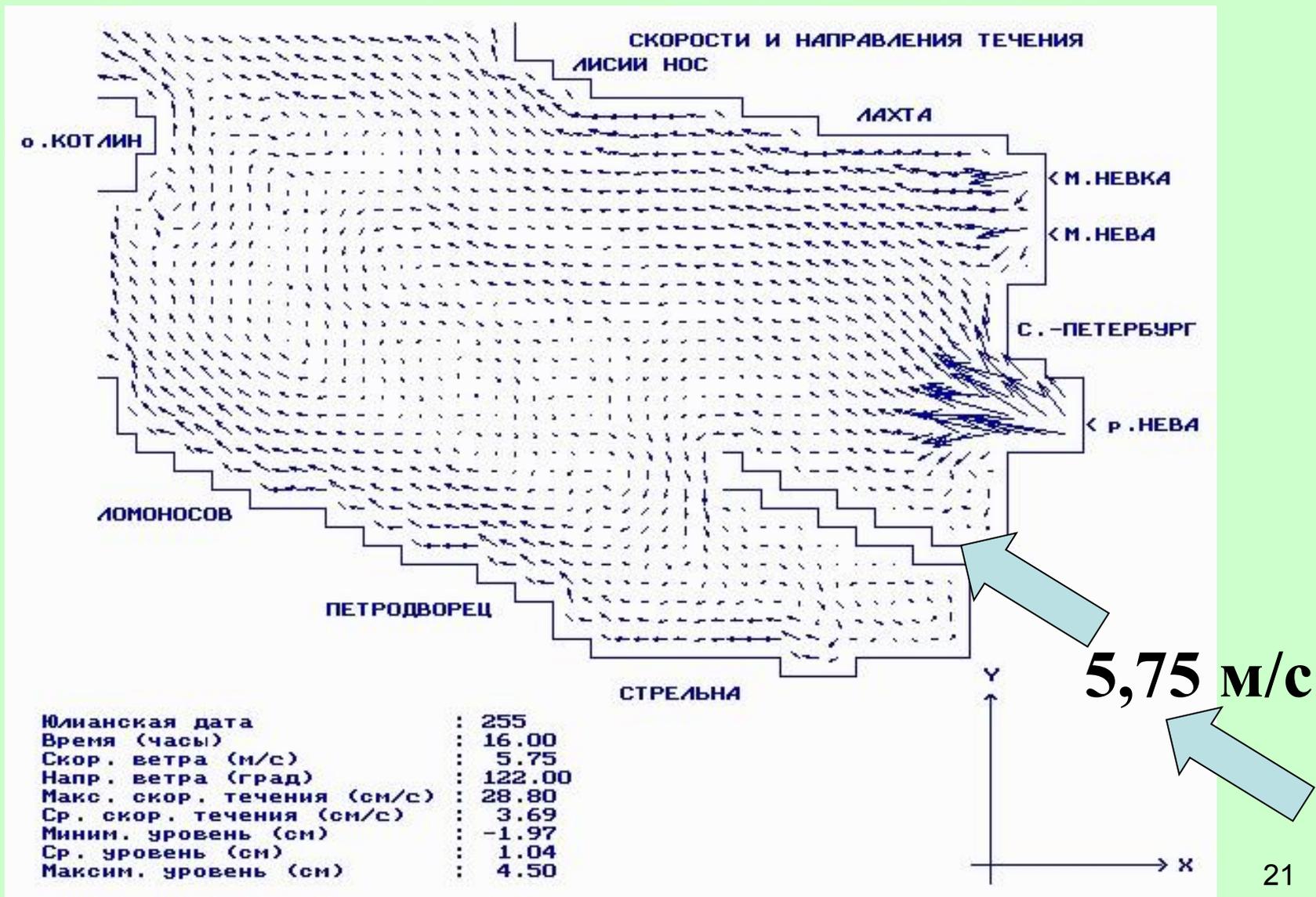


Площади водопропускных и судопропускных отверстий
даны в квадратных метрах

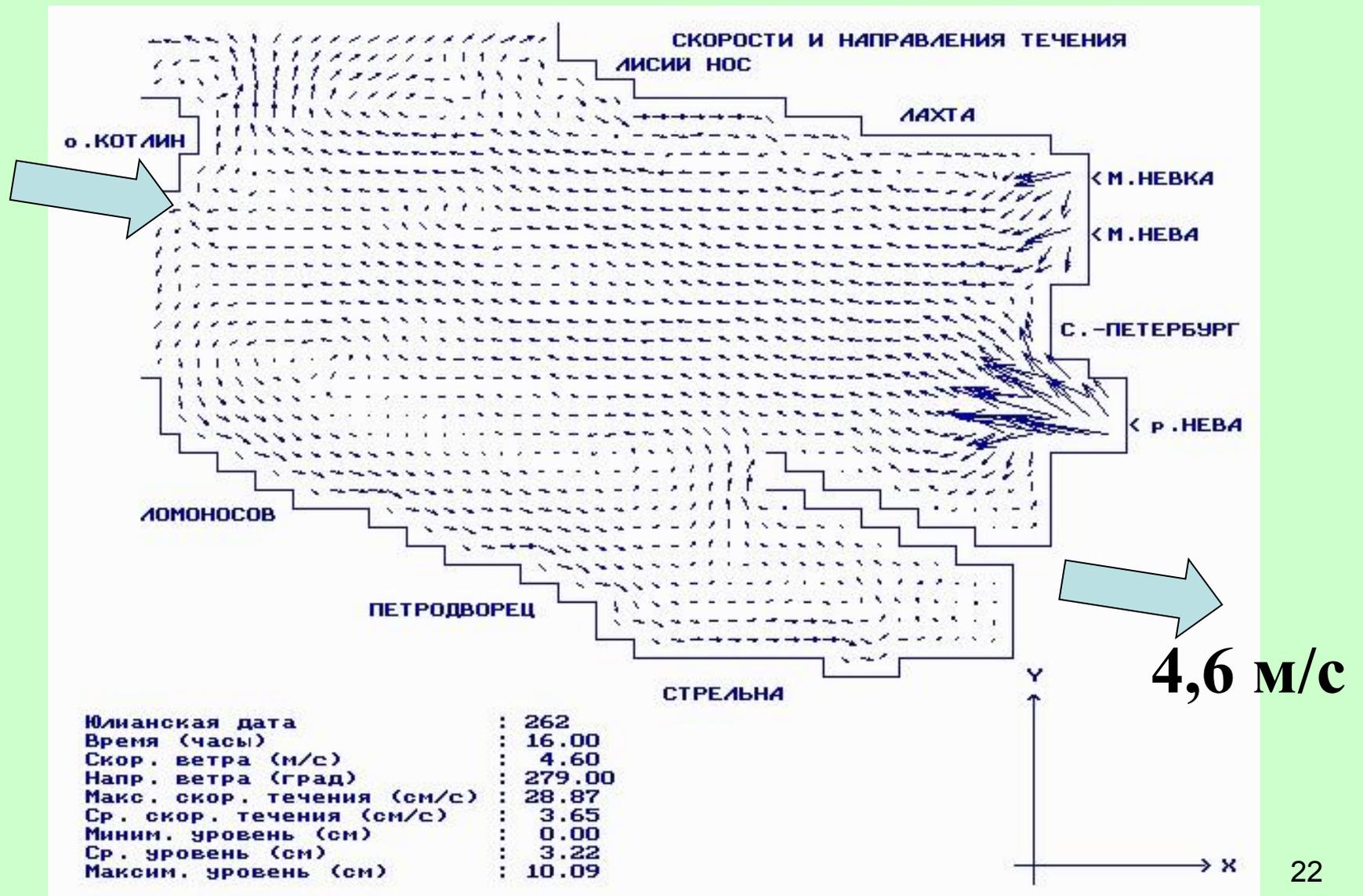
Схема расположения постоянных станций наблюдений в пределах акватории Невской губы



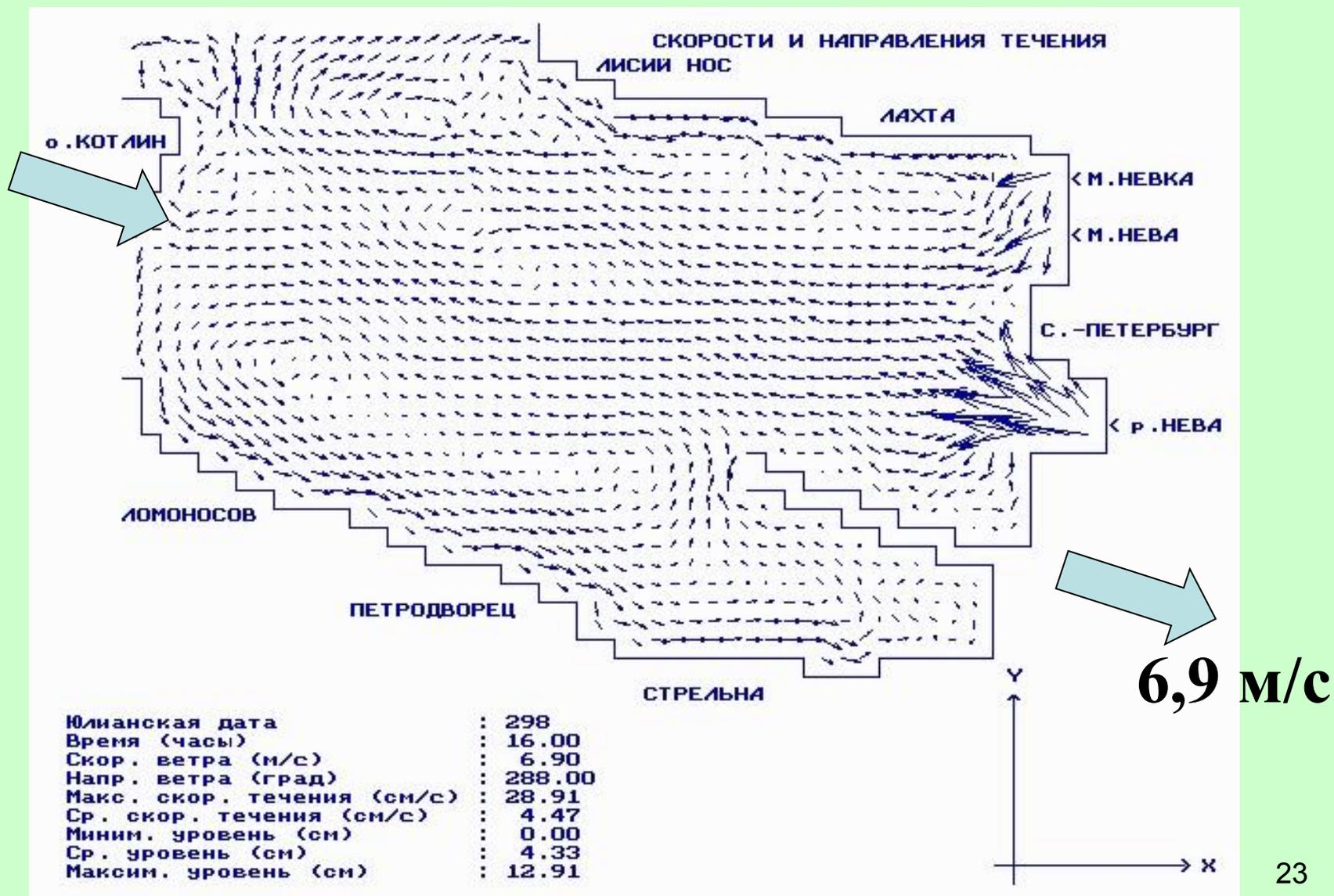
Примеры расчетов течений



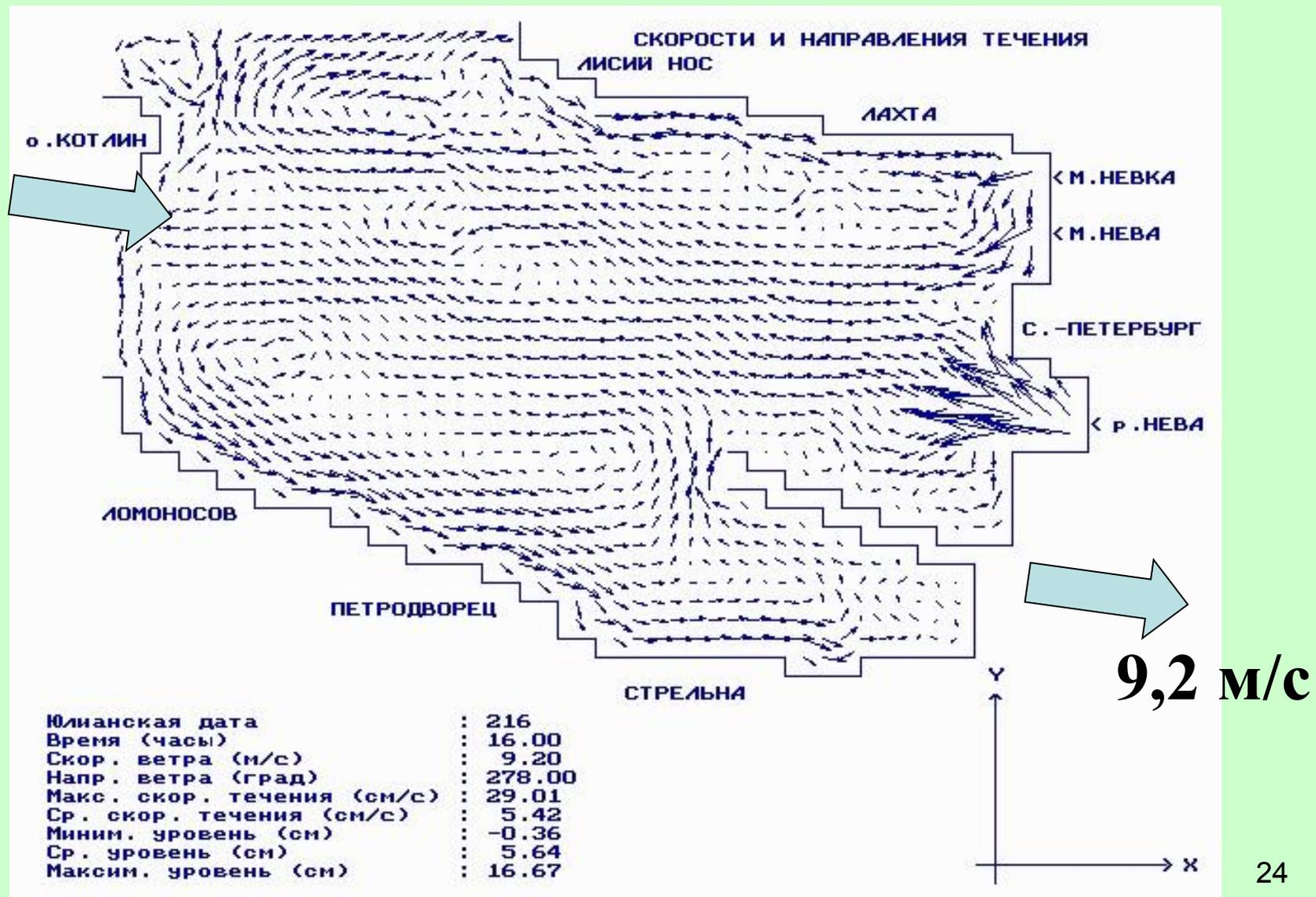
Примеры расчетов течений



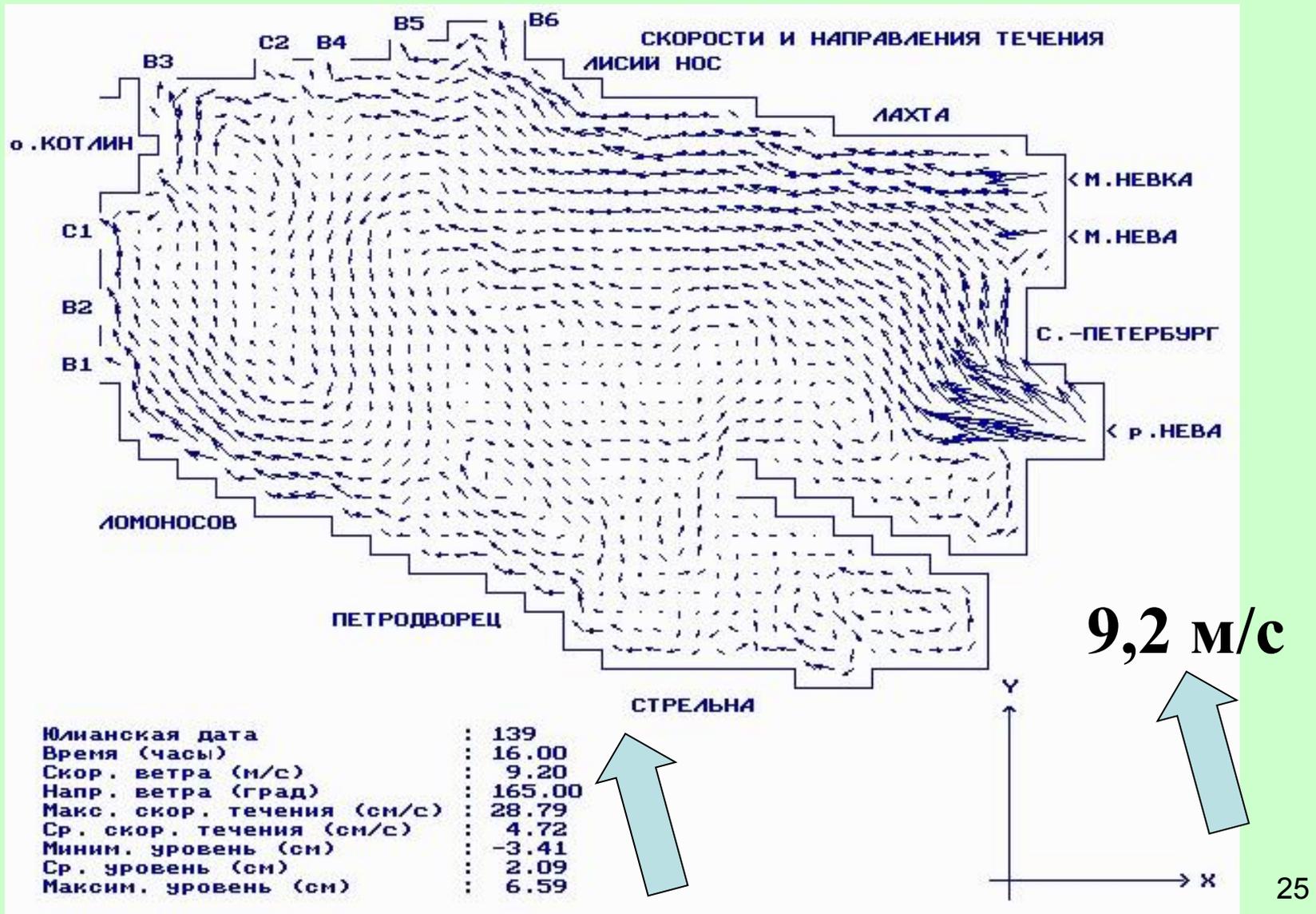
Примеры расчетов течений



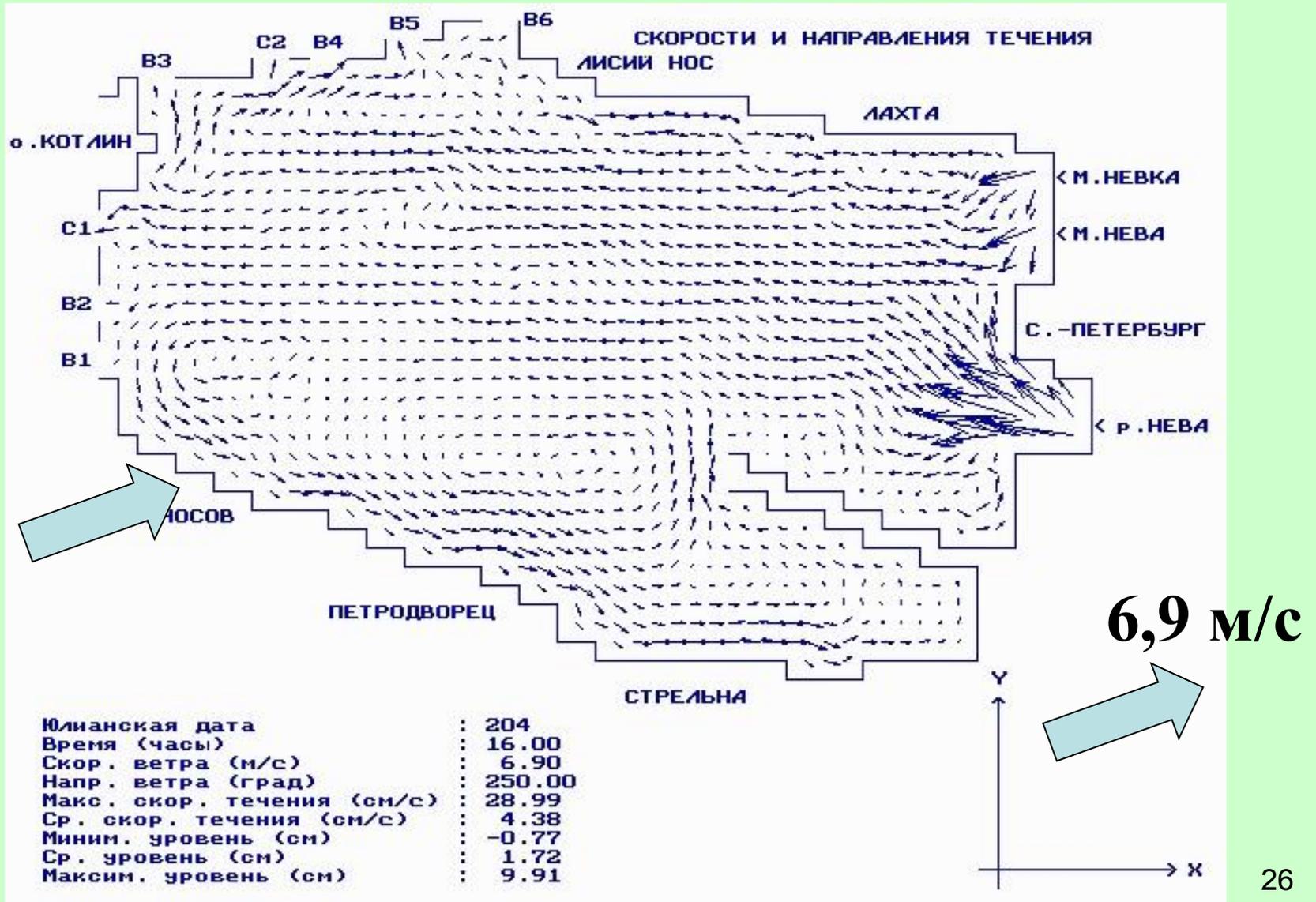
Примеры расчетов течений



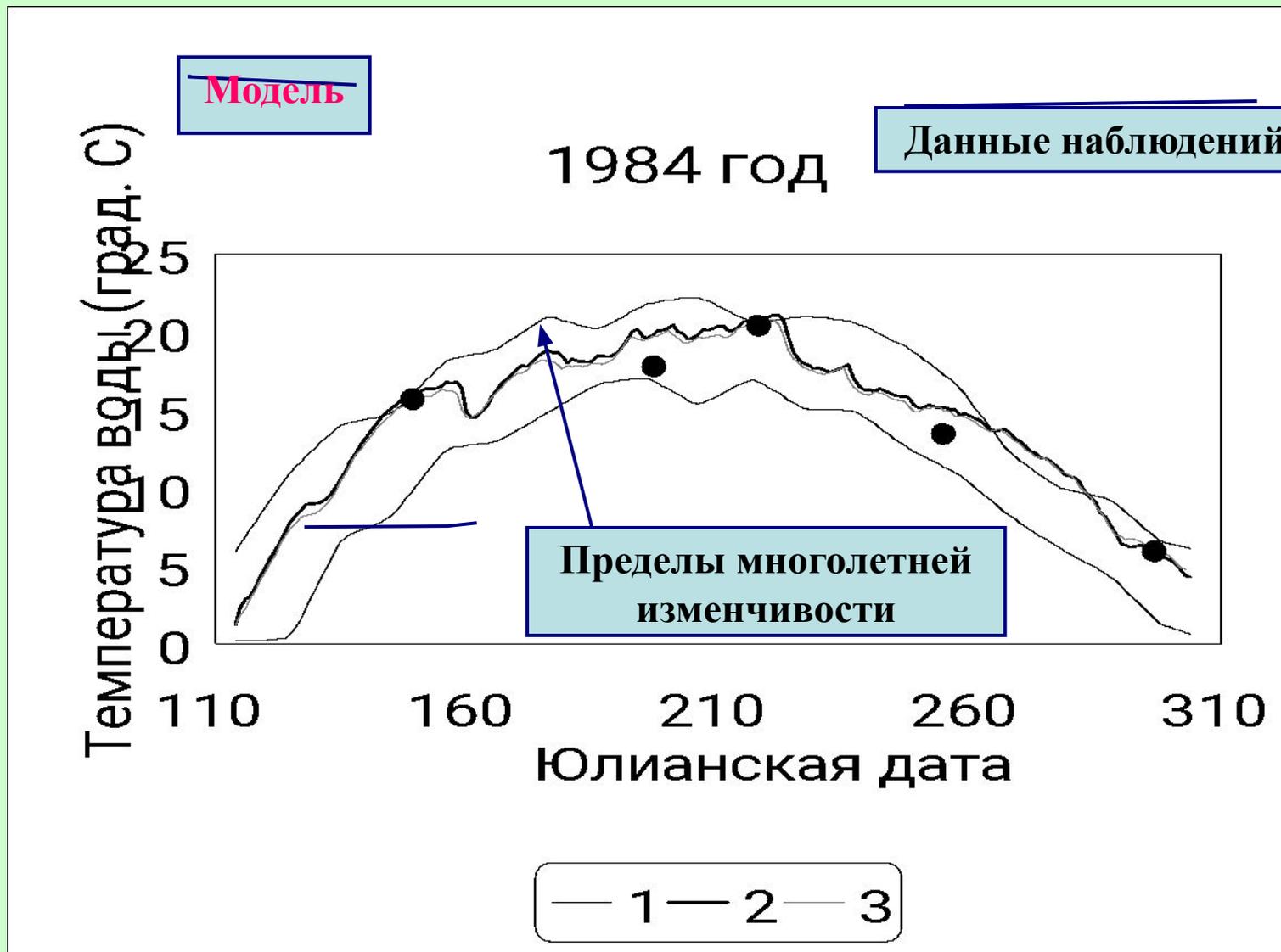
Примеры расчетов течений (проектные условия)



Примеры расчетов течений (проектные условия)



Примеры расчетов температуры воды

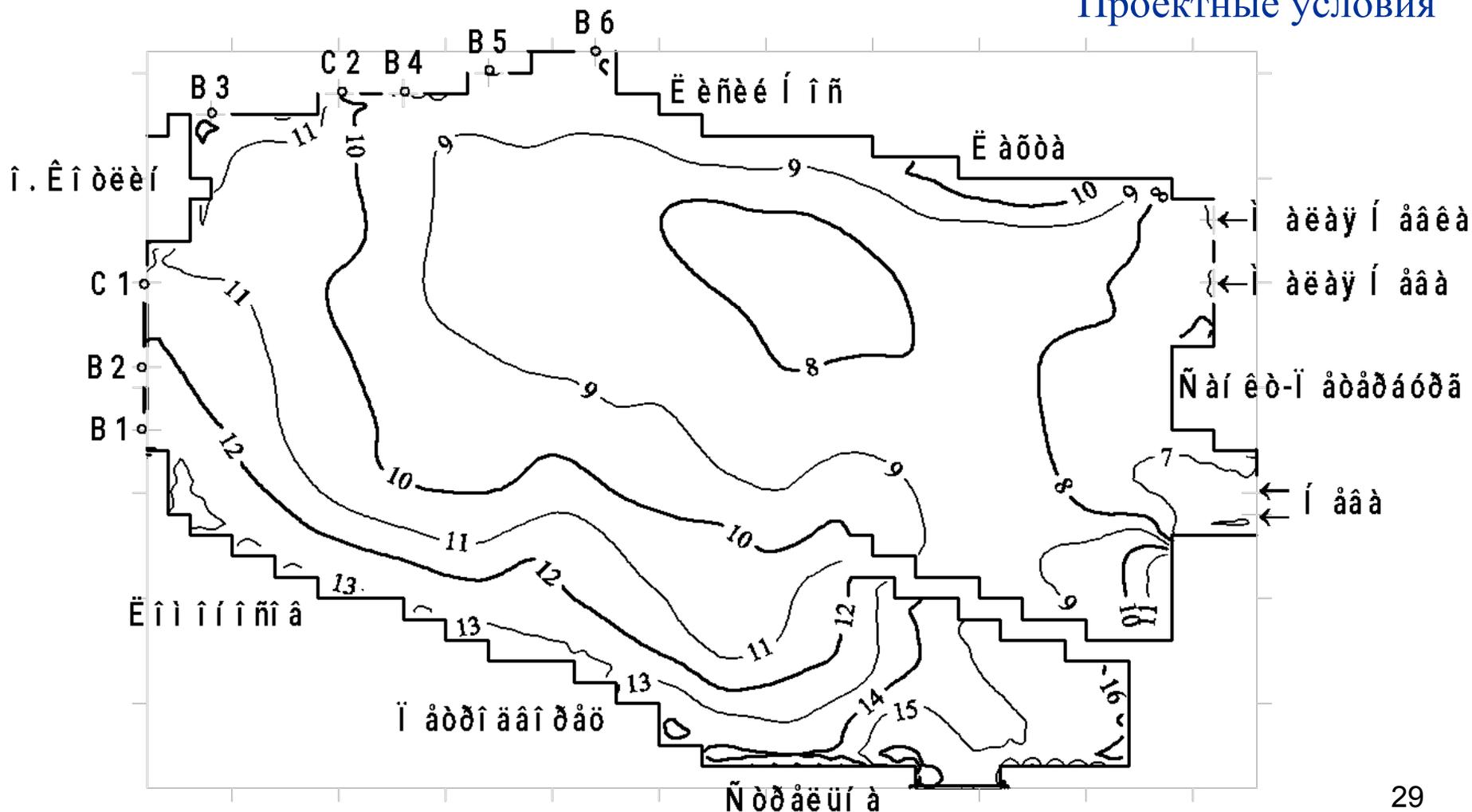


Примеры модельных полей средней по вертикали температуры воды

**Для построения полей температуры
в пределах расчетной области
нами использовался пакет
Surfer, v. 8.05 (Golden Software, Inc.)**

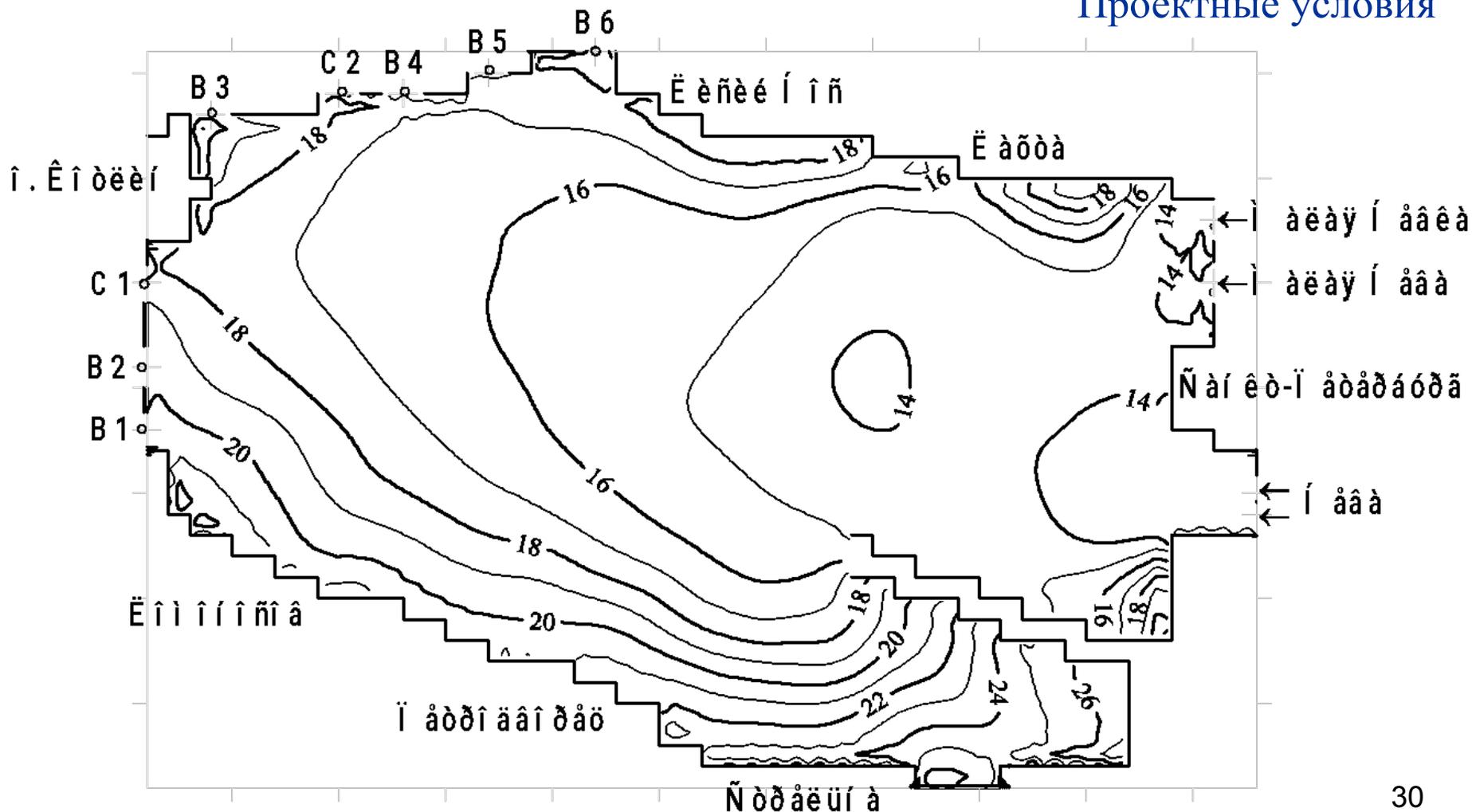
Примеры расчетов пространственного распределения температуры воды (19.05.87)

Проектные условия



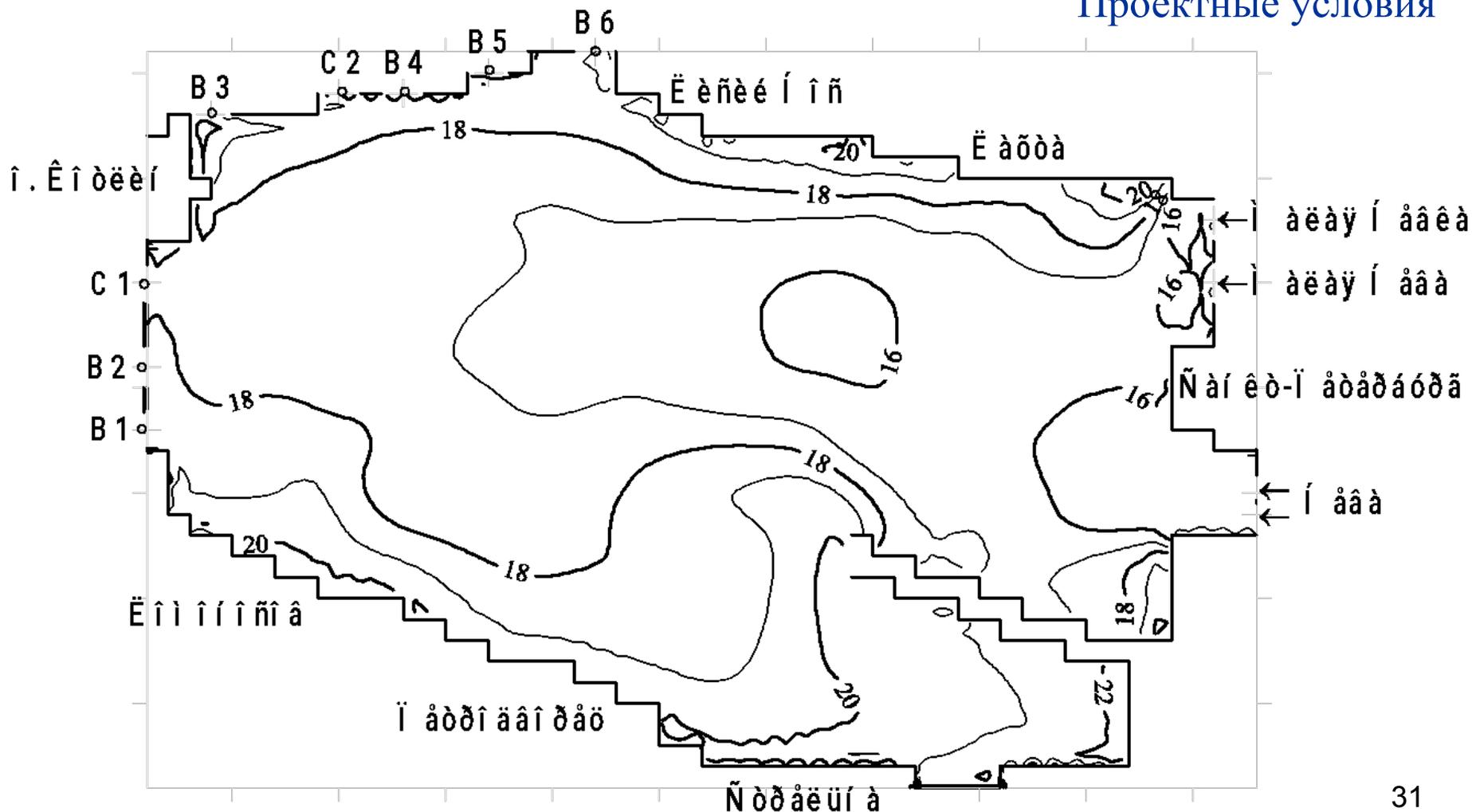
Примеры расчетов пространственного распределения температуры воды (25.06.87)

Проектные условия



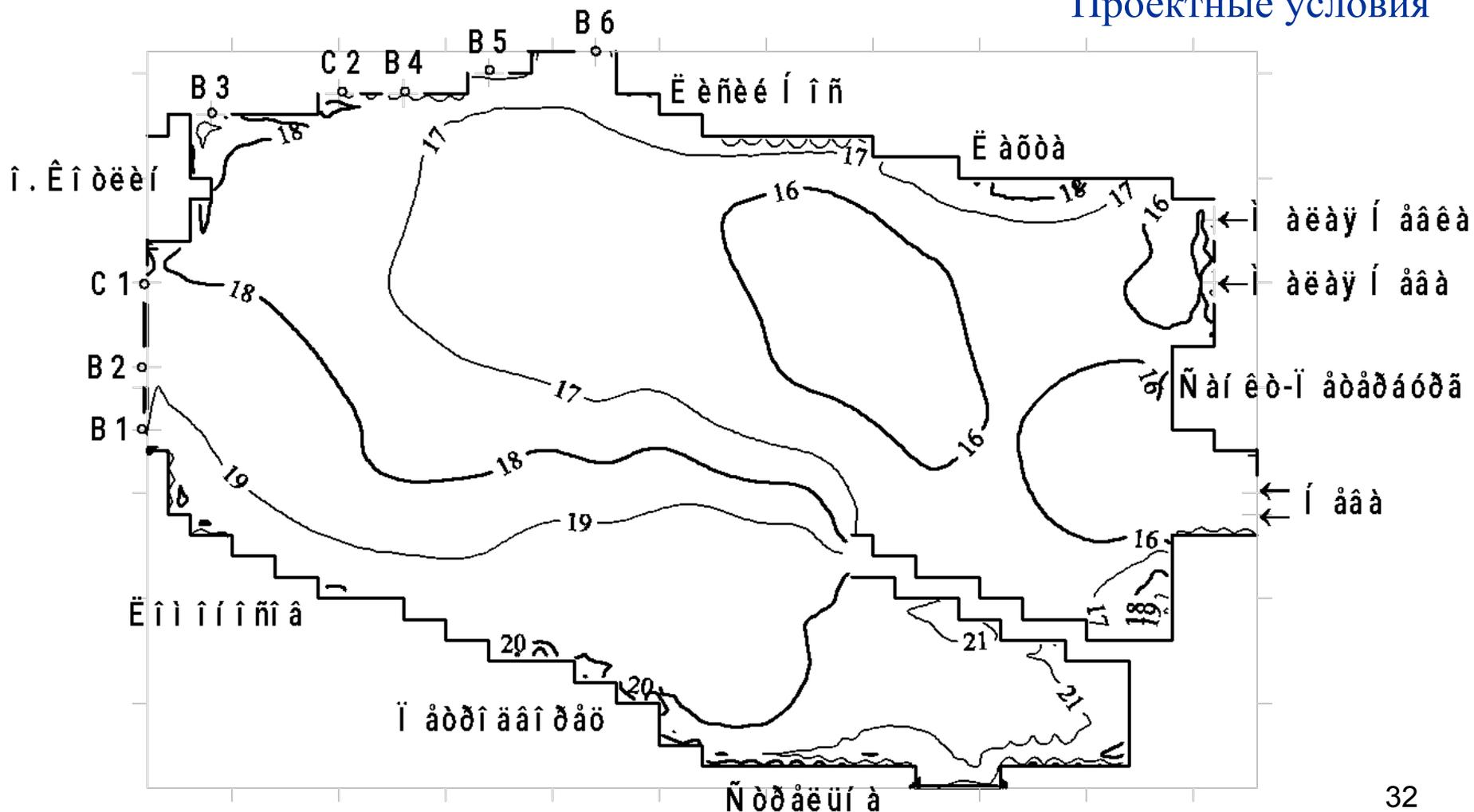
Примеры расчетов пространственного распределения температуры воды (23.07.87)

Проектные условия



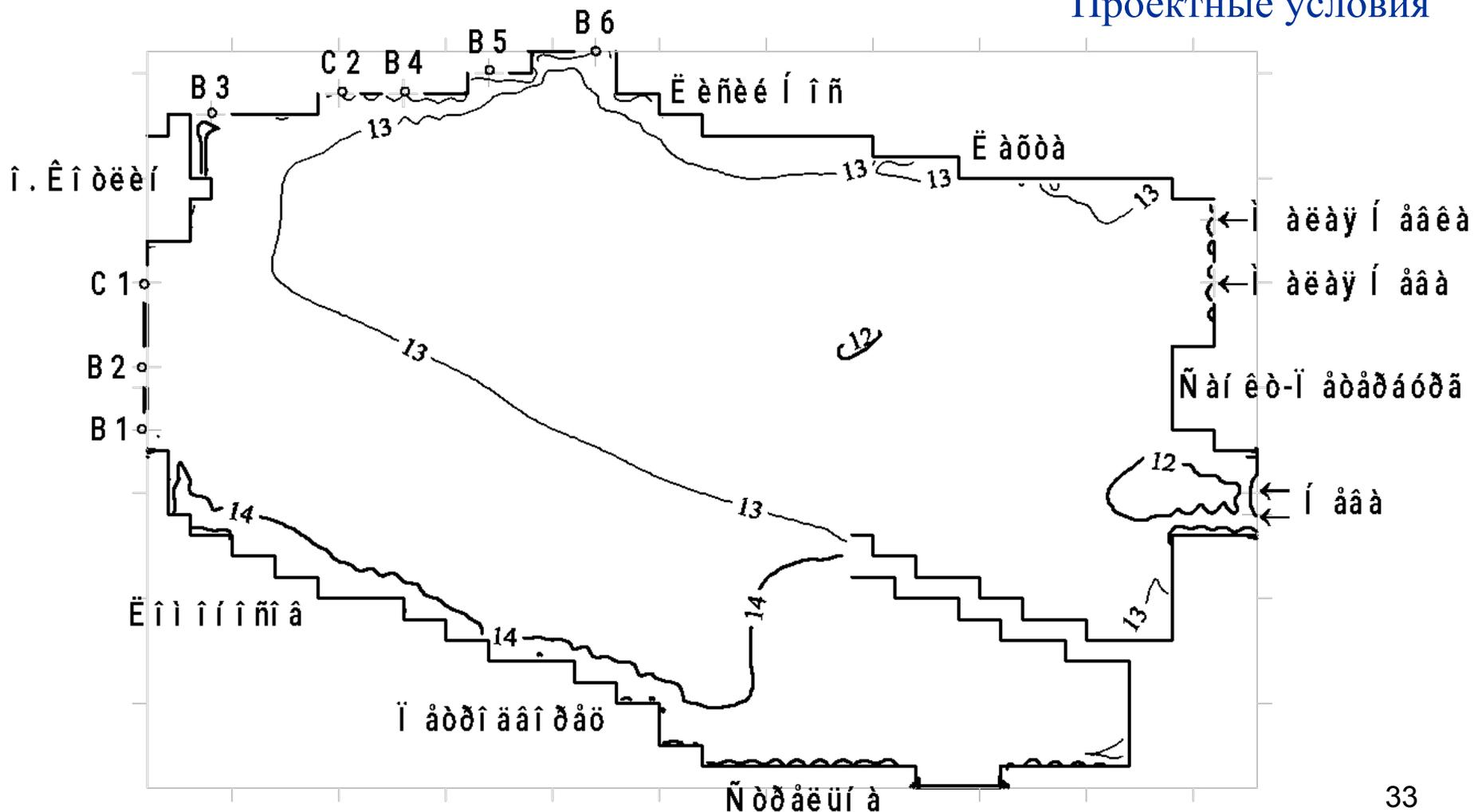
Примеры расчетов пространственного распределения температуры воды (06.08.87)

Проектные условия



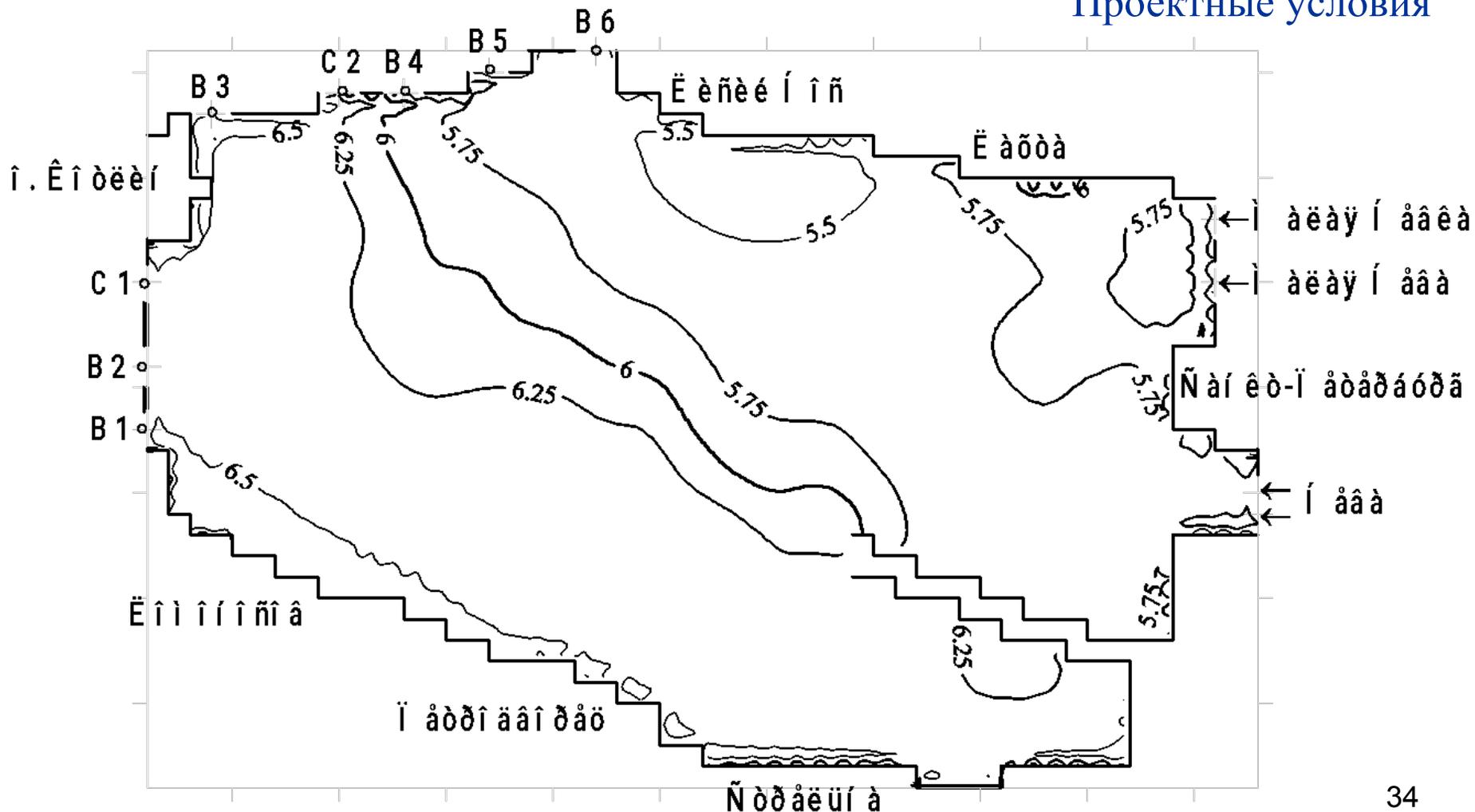
Примеры расчетов пространственного распределения температуры воды (17.09.87)

Проектные условия



Примеры расчетов пространственного распределения температуры воды (20.10.87)

Проектные условия



Как оценить точность модельных расчетов?

Критерий Тейла

$$f(\mathbf{p}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{obs}}} (T_{\text{obs}} - T_{\text{sim}})_i^2} / \left(\sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{obs}}} T_{\text{obs } i}^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{\text{obs}}} T_{\text{sim } i}^2} \right)$$

Значение критерия Тейла меняется от нуля до единицы. Чем оно ближе к нулю, тем лучше модельные расчеты соответствуют данным наблюдений.

Критерии Тейла

(для температуры)

Год/Месяц	V	VI	VII	VIII	IX	X
1984	0,0548	0,0307	0,0560	0,0456	0,0707	0,0927
1985	0,1437	0,0599	0,0527	0,0633	0,0651	0,0877
1986	0,0802	0,0455	0,0722	0,0368	0,1277	0,0758
1987	0,2093	0,1213	0,0583	0,0640	0,0613	0,0983

Блок для описания процессов трансформации соединений азота и фосфора в водоеме и динамики растворенного в воде кислорода

Система уравнений адвекции, турбулентной

формации веществ химико-биологического комплекса с конвективными процессами в едидивергентной форме

Трансформация полей компонентов экосистемы, обусловленная процессами совместной трансформации соединений азота и фосфора, а также динамики растворенного в воде кислорода

$$+ \frac{\partial C_n}{\partial y} + (W_n) \frac{\partial C_n}{\partial z} =$$

$$+ F_n(t, C_1, \dots, C_n), n = \overline{1, N}$$

Трансформация полей компонентов экосистемы, обусловленная процессами гравитационного оседания взвешенных веществ

Трансформация полей компонентов

Трансформация полей компонентов экосистемы, обусловленная турбулентной диффузией

Граничные условия

- **Твердый контур, створы вытекающих рек и открытая граница** – условие равенства нулю производной по направлению внешней нормали \mathbf{n} к границе водоема:

$$\partial C_n / \partial n = 0$$

- **Створы втекающих рек** – условие вида

$$\partial C_n / \partial n - V_n (C_n - C_{n_river}) = 0$$

Общая схема расщепления

1. На первом этапе интегрирования системы уравнений на временном интервале $(t_k, t_k + \tau)$ решаются уравнения переноса химических и биологических субстанций вдоль траекторий частиц (уравнения адвекции):

$$\frac{\partial C_n}{\partial t} + U \frac{\partial C_n}{\partial x} + V \frac{\partial C_n}{\partial y} = 0, n = \overline{1, N}$$

с начальным условием $C_n^{k+1/4}(t_k) = C_n^k$

Общая схема расщепления

2. На втором этапе на том же временном интервале решаются уравнения, описывающие процессы гравитационного оседания взвесей:

$$\frac{\partial C_n}{\partial t} + (W_s)_n \frac{\partial C_n}{\partial z} = 0, n = \overline{1, N}$$

с начальным условием $C_{n_PM}^{k+2/4}(t_k) = C_{n_PM}^{k+1/4}(t_k + \tau)$

Для растворенных веществ принимается равенство

$$C_{n_DM}^{k+2/4}(t_k + \tau) = C_{n_DM}^{k+1/4}(t_k + \tau)$$

Общая схема расщепления

3. На третьем этапе на том же временном интервале решаются уравнения турбулентного обмена субстанций:

$$\partial C_n / \partial t = (A_\eta)_n \Delta_\eta (C_n), n = \overline{1, N}$$

с начальным условием $C_n^{k+3/4}(t_k) = C_n^{k+2/4}(t_k + \tau)$

Общая схема расщепления

4. На последнем, четвертом этапе решается система уравнений, описывающая локальные химико-биологические превращения субстанций:

$$\partial C_n / \partial t = F_n(t, C_1, \dots, C_n), n = \overline{1, N}$$

с начальным условием $C_n^{k+1}(t_k) = C_n^{k+3/4}(t_k + \tau)$

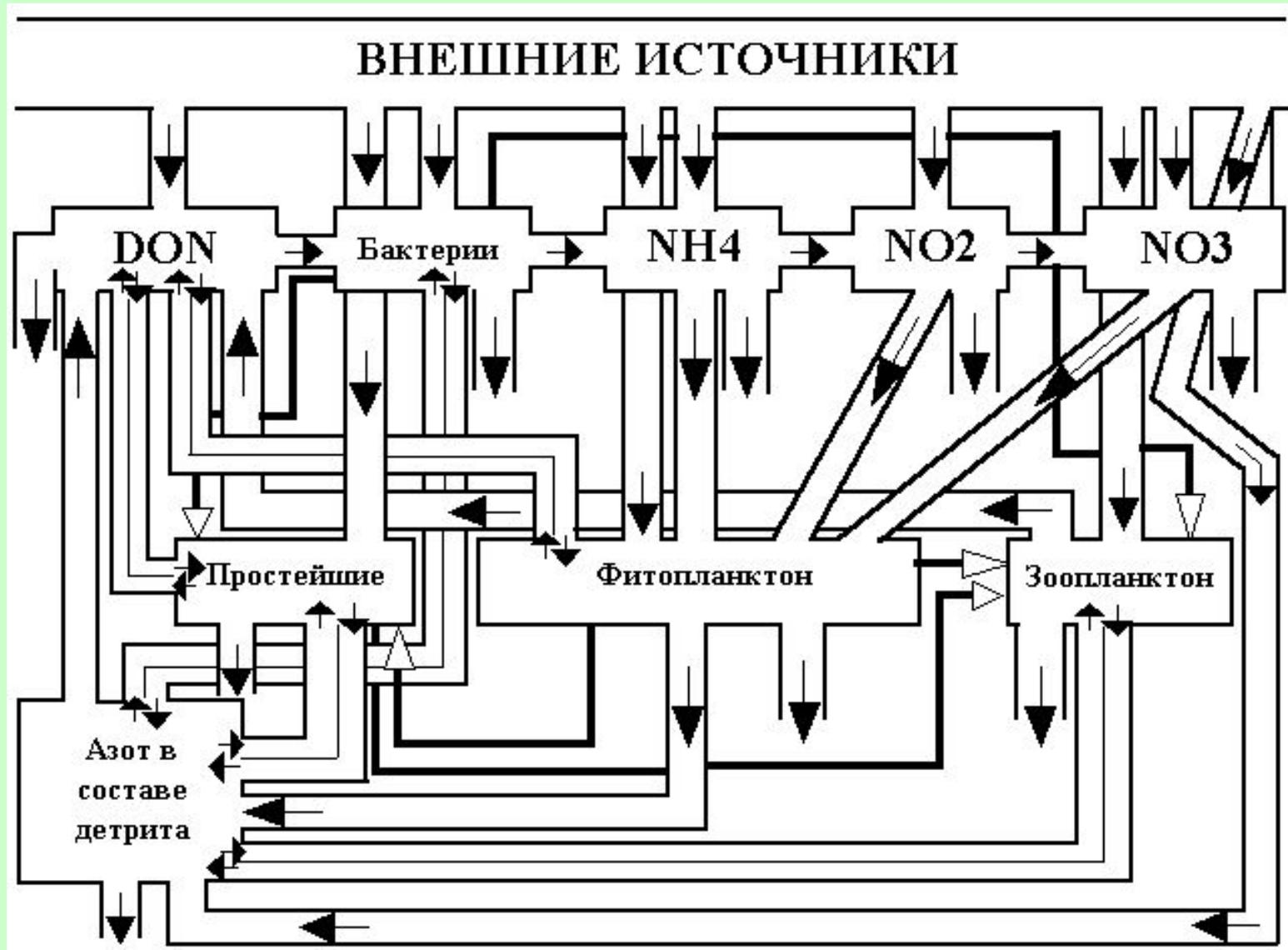
Математическое описание модели трансформации соединений азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода

**При разработке этой части модели большая помощь
была оказана вед. н. с. Института океанологии РАН,
д.х.н., проф. А.В. Леоновым, которому автор
приносит свою искреннюю благодарность.**

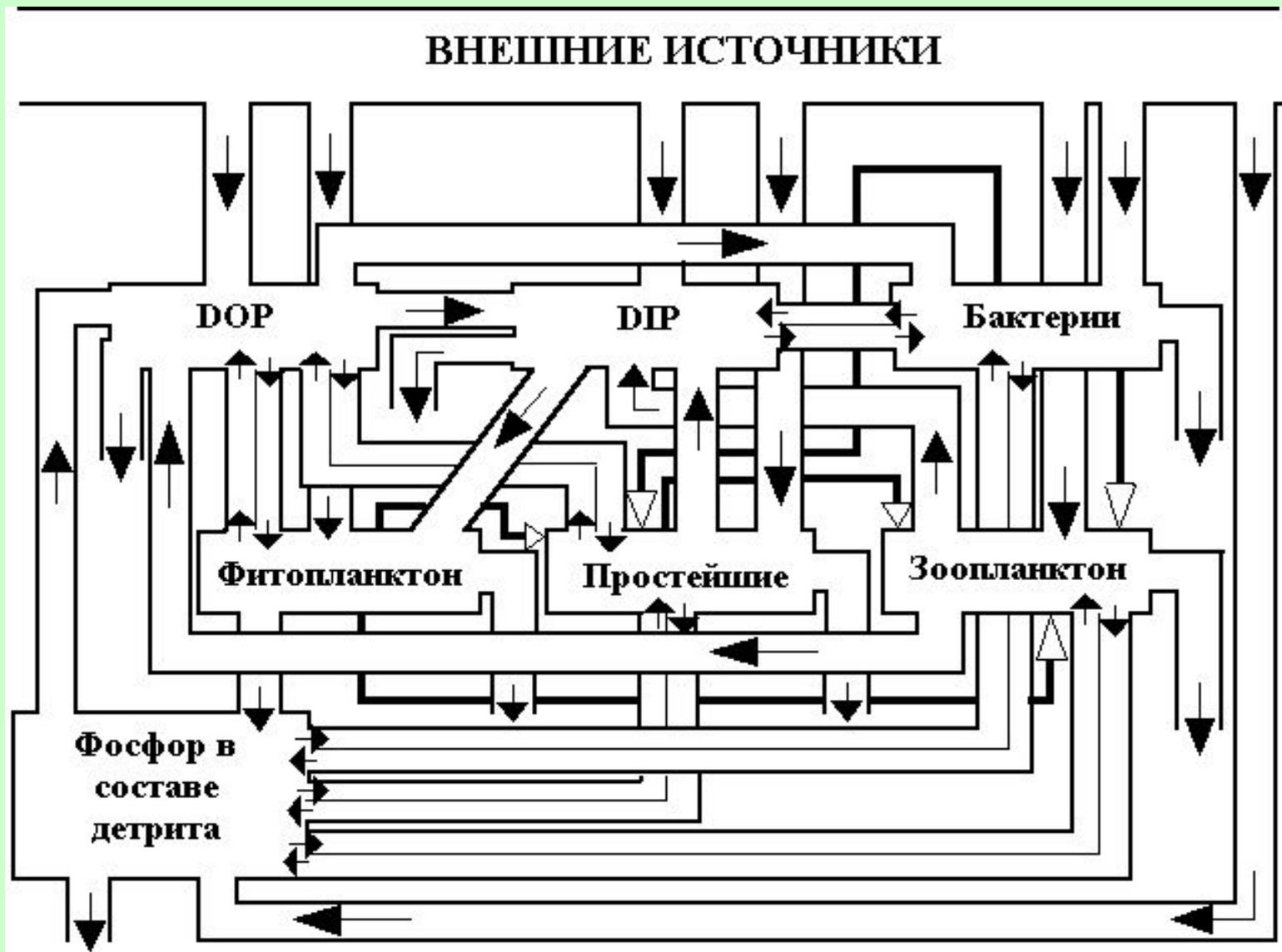
Назначение модели

- изучение внутригодовой пространственно-временной динамики химических и биологических показателей состояния водной среды;
- расчет скоростей процессов, ответственных за изменение концентраций веществ;
- расчет внутренних и внешних потоков веществ в различных районах исследуемых экосистем;
- расчет времени оборота всех рассматриваемых в модели химических и биологических компонентов;
- изучение реакции изучаемой экосистемы на изменение водного режима и биогенной нагрузки на водоем.

Цикл азота



Цикл фосфора



Запас взаимозаменяемых соединений азота:

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{Pool}_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} = \text{Pref}_{\text{Bacteria, DON}} \cdot C_{\text{DON}} + \text{Pref}_{\text{Bacteria, N_detr}} \cdot C_{\text{N_detr}}$$

для фитопланктона -

$$\begin{aligned} \text{Pool}_{\text{Algae}}^{\text{N}} = & \text{Pref}_{\text{Algae, NH}_4^+} \cdot C_{\text{NH}_4^+} + \text{Pref}_{\text{Algae, NO}_2^-} \cdot C_{\text{NO}_2^-} + \\ & + \text{Pref}_{\text{Algae, NO}_3^-} \cdot C_{\text{NO}_3^-} + \text{Pref}_{\text{Algae, DON}} \cdot C_{\text{DON}} \end{aligned}$$

для простейших -

$$\begin{aligned} \text{Pool}_{\text{Protozoa}}^{\text{N}} = & \text{Pref}_{\text{Protozoa, N_Bacteria}} \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} + \text{Pref}_{\text{Protozoa, N_Algae}} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{N}} + \\ & + \text{Pref}_{\text{Protozoa, DON}} \cdot C_{\text{DON}} + \text{Pref}_{\text{Protozoa, N_detr}} \cdot C_{\text{N_detr}} \end{aligned}$$

для зоопланктона -

$$\begin{aligned} \text{Pool}_{\text{Zoopl}}^{\text{N}} = & \text{Pref}_{\text{Zoopl, N_Bacteria}} \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} + \text{Pref}_{\text{Zoopl, N_Algae}} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{N}} + \\ & + \text{Pref}_{\text{Zoopl, N_Protozoa}} \cdot B_{\text{Protozoa}}^{\text{N}} + \text{Pref}_{\text{Zoopl, N_detr}} \cdot C_{\text{N_detr}} \end{aligned}$$

$$\sum = 1$$

Запас взаимозаменяемых соединений фосфора:

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{Pool}_{\text{Bacteria}}^{\text{P}} = \text{Pref}_{\text{Bacteria,DOP}} \cdot C_{\text{DOP}} + \text{Pref}_{\text{Bacteria,DIP}} \cdot C_{\text{DIP}} + \text{Pref}_{\text{Bacteria,P_detr}} \cdot C_{\text{P_detr}}$$

для фитопланктона -

$$\text{Pool}_{\text{Algae}}^{\text{P}} = \text{Pref}_{\text{Algae,DOP}} \cdot C_{\text{DOP}} + \text{Pref}_{\text{Algae,DIP}} \cdot C_{\text{DIP}}$$

для простейших -

$$\begin{aligned} \text{Pool}_{\text{Protozoa}}^{\text{P}} = & \text{Pref}_{\text{Protozoa,P_Bacteria}} \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{P}} + \text{Pref}_{\text{Protozoa,P_Algae}} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{P}} + \\ & + \text{Pref}_{\text{Protozoa,DOP}} \cdot C_{\text{DOP}} + \text{Pref}_{\text{Protozoa,P_detr}} \cdot C_{\text{P_detr}} ; \end{aligned}$$

для зоопланктона -

$$\begin{aligned} \text{Pool}_{\text{Zoopl}}^{\text{P}} = & \text{Pref}_{\text{Zoopl,P_Bacteria}} \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{P}} + \text{Pref}_{\text{Zoopl,P_Algae}} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{P}} + \\ & + \text{Pref}_{\text{Zoopl,P_Protozoa}} \cdot B_{\text{Zoopl}}^{\text{P}} + \text{Pref}_{\text{Zoopl,P_detr}} \cdot C_{\text{P_detr}} \cdot \end{aligned}$$

Максимальные скорости потребления соединений биогенных элементов:

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\max}(T_w, I_{\text{surf}}) = (\text{Uptake}_{\max})_{\text{Bacteria}} \cdot f(T_w)_{\text{Bacteria}} \cdot f(I_{\text{surf}})_{\text{Bacteria}}$$

для фитопланктона -

$$\text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\max}(T_w, I_{\text{surf}}) = (\text{Uptake}_{\max})_{\text{Algae}} \cdot f(T_w)_{\text{Algae}} \cdot f(I_{\text{surf}})_{\text{Algae}}$$

для простейших -

$$\text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\max}(T_w, I_{\text{surf}}) = (\text{Uptake}_{\max})_{\text{Protozoa}} \cdot f(T_w)_{\text{Protozoa}} \cdot f(I_{\text{surf}})_{\text{Protozoa}}$$

для зоопланктона -

$$\text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\max}(T_w, I_{\text{surf}}) = (\text{Uptake}_{\max})_{\text{Zoopl}} \cdot f(T_w)_{\text{Zoopl}} \cdot f(I_{\text{surf}})_{\text{Zoopl}}$$

Коррекция максимальных скоростей потребления веществ в зависимости от условий освещенности:

для гетеротрофных бактерий -

$$f(I_{\text{surf}})_{\text{Bacteria}} = 1,0$$

для фитопланктона -

$$f(I_{\text{surf}})_{\text{Algae}} = \frac{e}{(\varepsilon \cdot H_{\text{fot}})} \cdot \left(\exp\left(\frac{S_{0,t}}{(\sum Q_0)_{\text{opt}}} \times \exp(-\varepsilon \cdot H_{\text{fot}})\right) - \exp\left(\frac{S_{0,t}}{(\sum Q_0)_{\text{opt}}}\right) \right)$$

для простейших -

$$f(I_{\text{surf}})_{\text{Protozoa}} = 1,0$$

для зоопланктона -

$$f(I_{\text{surf}})_{\text{Zoopl}} = 1,0$$

Удельные скорости потребления соединений биогенных элементов гидробионтами:

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{SpecUptake}_{\text{Bacteria}} = \frac{\text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\max} (T_w, I_{\text{surf}})}{1.0 + B_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} / \text{Pool}_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} + B_{\text{Bacteria}}^{\text{P}} / \text{Pool}_{\text{Bacteria}}^{\text{P}}}$$

для фитопланктона -

$$\text{SpecUptake}_{\text{Algae}} = \frac{\text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\max} (T_w, I_{\text{surf}})}{1.0 + B_{\text{Algae}}^{\text{N}} / \text{Pool}_{\text{Algae}}^{\text{N}} + B_{\text{Algae}}^{\text{P}} / \text{Pool}_{\text{Algae}}^{\text{P}}}$$

для простейших -

$$\text{SpecUptake}_{\text{Protozoa}} = \frac{\text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\max} (T_w, I_{\text{surf}})}{1.0 + B_{\text{Protozoa}}^{\text{N}} / \text{Pool}_{\text{Protozoa}}^{\text{N}} + B_{\text{Protozoa}}^{\text{P}} / \text{Pool}_{\text{Protozoa}}^{\text{P}}}$$

для зоопланктона -

$$\text{SpecUptake}_{\text{Zoopl}} = \frac{\text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\max} (T_w, I_{\text{surf}})}{1.0 + B_{\text{Zoopl}}^{\text{N}} / \text{Pool}_{\text{Zoopl}}^{\text{N}} + B_{\text{Zoopl}}^{\text{P}} / \text{Pool}_{\text{Zoopl}}^{\text{P}}}$$

Скорости потребления отдельных азотсодержащих субстратов гетеротрофными бактериями:

скорость потребления бактериями растворенного органического азота -

$$\text{Uptake}_{\text{Bacteria, DON}} = \text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\max} (T_w, I_{\text{surf}}) \cdot \frac{\text{Pref}_{\text{Bacteria, DON}} \cdot C_{\text{DON}} \cdot \text{Pool}_{\text{Bacteria}}^{\text{P}}}{\text{MB}_{\text{Bacteria}}}$$

скорость потребления бактериями азота в составе детрита -

$$\text{Uptake}_{\text{Bacteria, N_detr}} = \text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\max} (T_w, I_{\text{surf}}) \cdot \frac{\text{Pref}_{\text{Bacteria, N_detr}} \cdot C_{\text{N_detr}} \cdot \text{Pool}_{\text{Bacteria}}^{\text{P}}}{\text{MB}_{\text{Bacteria}}}$$

Суммарные скорости потребления соединений азота гидробионтами:

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\sum \text{N}} = \text{Uptake}_{\text{Bacteria, DON}} + \text{Uptake}_{\text{Bacteria, N}_{\text{detr}}}$$

для фитопланктона -

$$\text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\sum \text{N}} = \text{Uptake}_{\text{Algae, NH}_4^+} + \text{Uptake}_{\text{Algae, NO}_2^-} + \text{Uptake}_{\text{Algae, NO}_3^-} + \text{Uptake}_{\text{Algae, DON}}$$

для простейших -

$$\begin{aligned} \text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\sum \text{N}} &= \text{Uptake}_{\text{Protozoa, N}_{\text{Bacteria}}} + \text{Uptake}_{\text{Protozoa, N}_{\text{Algae}}} + \\ &+ \text{Uptake}_{\text{Protozoa, DON}} + \text{Uptake}_{\text{Protozoa, N}_{\text{detr}}} \end{aligned}$$

для зоопланктона -

$$\begin{aligned} \text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\sum \text{N}} &= \text{Uptake}_{\text{Zoopl, N}_{\text{Bacteria}}} + \text{Uptake}_{\text{Zoopl, N}_{\text{Algae}}} + \\ &+ \text{Uptake}_{\text{Zoopl, N}_{\text{Protozoa}}} + \text{Uptake}_{\text{Zoopl, N}_{\text{detr}}} \end{aligned}$$

Суммарные скорости потребления соединений фосфора гидробионтами:

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\Sigma P} = \text{Uptake}_{\text{Bacteria,DOP}} + \text{Uptake}_{\text{Bacteria,DIP}} + \text{Uptake}_{\text{Bacteria,P_detr}}$$

для фитопланктона -

$$\text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\Sigma P} = \text{Uptake}_{\text{Algae,DOP}} + \text{Uptake}_{\text{Algae,DIP}}$$

для простейших -

$$\begin{aligned} \text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\Sigma P} = & \text{Uptake}_{\text{Protozoa,P_Bacteria}} + \text{Uptake}_{\text{Protozoa,P_Algae}} + \\ & + \text{Uptake}_{\text{Protozoa,DOP}} + \text{Uptake}_{\text{Protozoa,P_detr}} \end{aligned}$$

для зоопланктона -

$$\begin{aligned} \text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\Sigma P} = & \text{Uptake}_{\text{Zoopl,P_Bacteria}} + \text{Uptake}_{\text{Zoopl,P_Algae}} + \\ & + \text{Uptake}_{\text{Zoopl,P_Protozoa}} + \text{Uptake}_{\text{Zoopl,P_detr}} \end{aligned}$$

Коэффициенты выделительной активности гидробионтов (цикл азота):

для гетеротрофных бактерий -

$$\left(\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^{\sum N}\right)^* = \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^N\right)_1 \cdot \text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\sum N}}{1,0 + \left(\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^N\right)_2 \cdot \text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\sum N}} + \left(1,0 - \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^N\right)_1}{\left(\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^N\right)_2}\right)$$

для фитопланктона -

$$\left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^{\sum N}\right)^* = \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^N\right)_1 \cdot \text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\sum N}}{1,0 + \left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^N\right)_2 \cdot \text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\sum N}} + \left(1,0 - \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^N\right)_1}{\left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^N\right)_2}\right)$$

для простейших -

$$\left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^{\sum N}\right)^* = \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^N\right)_1 \cdot \text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\sum N}}{1,0 + \left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^N\right)_2 \cdot \text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\sum N}} + \left(1,0 - \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^N\right)_1}{\left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^N\right)_2}\right)$$

для зоопланктона -

$$\left(\text{Excr}_{\text{Zoopl}}^{\sum N}\right)^* = \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Zoopl}}^N\right)_1 \cdot \text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\sum N}}{1,0 + \left(\text{Excr}_{\text{Zoopl}}^N\right)_2 \cdot \text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\sum N}} + \left(1,0 - \frac{\left(\text{Excr}_{\text{Zoopl}}^N\right)_1}{\left(\text{Excr}_{\text{Zoopl}}^N\right)_2}\right)$$

Скорости метаболических выделений гидробионтами соединений азота:

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^{\sum N} = \left(\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^{\sum N} \right)^* \cdot \text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\sum N}$$

для фитопланктона -

$$\text{Excr}_{\text{Algae}}^{\sum N} = \left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^{\sum N} \right)^* \cdot \text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\sum N}$$

для простейших -

$$\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^{\sum N} = \left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^{\sum N} \right)^* \cdot \text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\sum N}$$

для зоопланктона -

$$\text{Excr}_{\text{Zoopl}}^{\sum N} = \left(\text{Excr}_{\text{Zoopl}}^{\sum N} \right)^* \cdot \text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\sum N}$$

Скорости метаболических выделений гидробионтами соединений фосфора:

для гетеротрофных бактерий -

$$Excr_{Bacteria}^{\sum P} = \left(Excr_{Bacteria}^{\sum P} \right)^* \cdot Uptake_{Bacteria}^{\sum P}$$

для фитопланктона -

$$Excr_{Algae}^{\sum P} = \left(Excr_{Algae}^{\sum P} \right)^* \cdot Uptake_{Algae}^{\sum P}$$

для простейших -

$$Excr_{Protozoa}^{\sum P} = \left(Excr_{Protozoa}^{\sum P} \right)^* \cdot Uptake_{Protozoa}^{\sum P}$$

для зоопланктона -

$$Excr_{Zoopl}^{\sum P} = \left(Excr_{Zoopl}^{\sum P} \right)^* \cdot Uptake_{Zoopl}^{\sum P}$$

Удельные скорости смертности гидробионтов (цикл азота):

для гетеротрофных бактерий -

$$\text{Mort}_{\text{Bacteria}}^{\sum N} = \left(\text{Mort}_{\text{Bacteria}}^N\right)_1 + \left(\text{Mort}_{\text{Bacteria}}^N\right)_2 \cdot B_{\text{Bacteria}}^N / \text{Uptake}_{\text{Bacteria}}^{\sum N}$$

для фитопланктона -

$$\text{Mort}_{\text{Algae}}^{\sum N} = \left(\text{Mort}_{\text{Algae}}^N\right)_1 + \left(\text{Mort}_{\text{Algae}}^N\right)_2 \cdot B_{\text{Algae}}^N / \text{Uptake}_{\text{Algae}}^{\sum N}$$

для простейших -

$$\text{Mort}_{\text{Protozoa}}^{\sum N} = \left(\text{Mort}_{\text{Protozoa}}^N\right)_1 + \left(\text{Mort}_{\text{Protozoa}}^N\right)_2 \cdot B_{\text{Protozoa}}^N / \text{Uptake}_{\text{Protozoa}}^{\sum N}$$

для зоопланктона -

$$\text{Mort}_{\text{Zoopl}}^{\sum N} = \left(\text{Mort}_{\text{Zoopl}}^N\right)_1 + \left(\text{Mort}_{\text{Zoopl}}^N\right)_2 \cdot B_{\text{Zoopl}}^N / \text{Uptake}_{\text{Zoopl}}^{\sum N}$$

Расчет коэффициентов трансформации веществ:

коэффициент трансформации азота в составе детрита в растворенный органический азот -

$$\text{TransfR}_{\text{N_detr} \rightarrow \text{DON}}(T_w) = \text{TransfR}_{\text{N_detr} \rightarrow \text{DON}}^* \cdot T_w$$

≅ при 0° C

коэффициент трансформации аммиачного азота в азот нитритов -

$$\text{TransfR}_{\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-}(T_w) = \text{TransfR}_{\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-}^* \cdot \theta^{T_w - 20,0}$$

при 20° C

коэффициент трансформации азота нитритов в азот нитратов -

$$\text{TransfR}_{\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-}(T_w) = \text{TransfR}_{\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-}^* \cdot \theta^{T_w - 20,0}$$

при 20° C

Расчет коэффициентов трансформации веществ:

коэффициент трансформации фосфора в составе детрита в растворенный органический фосфор -

$$\text{TransfR}_{\text{P_detr} \rightarrow \text{DOP}}(T_w) = \text{TransfR}_{\text{P_detr} \rightarrow \text{DOP}}^* \cdot T_w$$

≅ при 0° C

коэффициент трансформации растворенного органического фосфора
в растворенный неорганический фосфор -

$$\text{TransfR}_{\text{DOP} \rightarrow \text{DIP}}(T_w) = \text{TransfR}_{\text{DOP} \rightarrow \text{DIP}}^* \cdot \theta^{T_w - 20,0}$$

при 20° C

скорость обмена кислородом между водой и атмосферой -

$$\text{Exchange}_{\text{O}_2}(T_w) = \text{Exchange}_{\text{O}_2}^* \cdot \theta^{T_w - 20,0}$$

при 20° C

Уравнения модели

скорость изменения биомассы гетеротрофных бактерий (в единицах азота) -

$$\text{Rate}_{\text{Bacteria}}^{\Sigma N} = \left(\text{SpecUptake}_{\text{Bacteria}} - \text{Excr}_{\text{Bacteria}}^{\Sigma N} - \text{Mort}_{\text{Bacteria}}^{\Sigma N} \right) \cdot B_{\text{Bacteria}}^N - \\ - \text{Uptake}_{\text{Protozoa}, N_{\text{Bacteria}}} \cdot B_{\text{Protozoa}}^N - \text{Uptake}_{\text{Zoopl}, N_{\text{Bacteria}}} \cdot B_{\text{Zoopl}}^N$$

скорость изменения биомассы гетеротрофных бактерий (в единицах фосфора) -

$$\text{Rate}_{\text{Bacteria}}^{\Sigma P} = \left(\text{SpecUptake}_{\text{Bacteria}} - \text{Excr}_{\text{Bacteria}}^{\Sigma P} - \text{Mort}_{\text{Bacteria}}^{\Sigma P} \right) \cdot B_{\text{Bacteria}}^P - \\ - \text{Uptake}_{\text{Protozoa}, P_{\text{Bacteria}}} \cdot B_{\text{Protozoa}}^P - \text{Uptake}_{\text{Zoopl}, P_{\text{Bacteria}}} \cdot B_{\text{Zoopl}}^P$$

Уравнения модели

скорость изменения растворенных фракций органического азота -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{\text{DON}} = & \text{TransfR}_{\text{N_detr} \rightarrow \text{DON}}(T_w) \cdot C_{\text{N_detr}} - \text{Uptake}_{\text{Bacteria, DON}} \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} + \\ & + \left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^{\sum \text{N}} - \text{Uptake}_{\text{Algae, DON}} \right) \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{N}} + \\ & + \left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^{\sum \text{N}} - \text{Uptake}_{\text{Protozoa, DON}} \right) \cdot B_{\text{Protozoa}}^{\text{N}} + \text{Excr}_{\text{Zoopl}}^{\sum \text{N}} \cdot B_{\text{Zoopl}}^{\text{N}} \end{aligned}$$

скорость изменения концентрации аммонийного азота -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{\text{NH}_4^+} = & -\text{TransfR}_{\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-}(T_w) \cdot C_{\text{NH}_4^+} + \\ & + \text{Excr}_{\text{Bacteria}}^{\sum \text{N}} \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} - \text{Uptake}_{\text{Algae, NH}_4^+} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{N}} \end{aligned}$$

скорость изменения концентрации азота нитритов -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{\text{NO}_2^-} = & \text{TransfR}_{\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-}(T_w) \cdot C_{\text{NH}_4^+} - \text{TransfR}_{\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-}(T_w) \cdot C_{\text{NO}_2^-} - \\ & - \text{Uptake}_{\text{Algae, NO}_2^-} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{N}} \end{aligned}$$

Уравнения модели

скорость изменения азота нитратов -

$$\text{Rate}_{\text{NO}_3^-} = \text{TransfR}_{\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-} (T_w) \cdot C_{\text{NO}_2^-} - \text{Uptake}_{\text{Algae, NO}_3^-} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{N}}$$

скорость изменения концентрации азота в составе детрита -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{\text{N_detr}} = & -\text{TransfR}_{\text{N_detr} \rightarrow \text{DON}} (T_w) \cdot C_{\text{N_detr}} + \\ & + \left(\text{Mort}_{\text{Bacteria}}^{\sum \text{N}} - \text{Uptake}_{\text{Bacteria, N_detr}} \right) \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{N}} + \text{Mort}_{\text{Algae}}^{\sum \text{N}} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{N}} + \\ & + \left(\text{Mort}_{\text{Protozoa}}^{\sum \text{N}} - \text{Uptake}_{\text{Protozoa, N_detr}} \right) \cdot B_{\text{Protozoa}}^{\text{N}} + \\ & + \left(\text{Mort}_{\text{Zoopl}}^{\sum \text{N}} - \text{Uptake}_{\text{Zoopl, N_detr}} \right) \cdot B_{\text{Zoopl}}^{\text{N}} \end{aligned}$$

Уравнения модели

скорость изменения растворенных фракций органического фосфора -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{\text{DOP}} = & \text{TransfR}_{\text{P_detr} \rightarrow \text{DOP}}(T_w) \cdot C_{\text{P_detr}} - \text{TransfR}_{\text{DOP} \rightarrow \text{DIP}}(T_w) \cdot C_{\text{DOP}} - \\ & - \text{Uptake}_{\text{Bacteria, DOP}} \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{P}} + \\ & + \left(\text{Excr}_{\text{Algae}}^{\sum \text{P}} - \text{Uptake}_{\text{Algae, DOP}} \right) \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{P}} + \\ & + \left(\text{Excr}_{\text{Protozoa}}^{\sum \text{P}} - \text{Uptake}_{\text{Protozoa, DOP}} \right) \cdot B_{\text{Protozoa}}^{\text{P}} + \text{Excr}_{\text{Zoopl}}^{\sum \text{P}} \cdot B_{\text{Zoopl}}^{\text{P}} \end{aligned}$$

скорость изменения растворенного неорганического фосфора -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{\text{DIP}} = & \text{TransfR}_{\text{DOP} \rightarrow \text{DIP}}(T_w) \cdot C_{\text{DOP}} + \\ & + \left(\text{Excr}_{\text{Bacteria}}^{\sum \text{P}} - \text{Uptake}_{\text{Bacteria, DIP}} \right) \cdot B_{\text{Bacteria}}^{\text{P}} - \text{Uptake}_{\text{Algae, DIP}} \cdot B_{\text{Algae}}^{\text{P}} + \\ & + \text{Excr}_{\text{Protozoa}}^{\sum \text{P}} \cdot B_{\text{Protozoa}}^{\text{P}} + \text{Excr}_{\text{Zoopl}}^{\sum \text{P}} \cdot B_{\text{Zoopl}}^{\text{P}} \end{aligned}$$

Уравнения модели

скорость изменения концентрации фосфора в составе детрита -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{P_detr} = & -\text{TransfR}_{P_detr \rightarrow \text{DOP}}(T_w) \cdot C_{P_detr} + \\ & + \left(\text{Mort}_{\text{Bacteria}}^{\sum P} - \text{Uptake}_{\text{Bacteria}, P_detr} \right) \cdot B_{\text{Bacteria}}^P + \text{Mort}_{\text{Algae}}^{\sum P} \cdot B_{\text{Algae}}^P + \\ & + \left(\text{Mort}_{\text{Protozoa}}^{\sum P} - \text{Uptake}_{\text{Protozoa}, P_detr} \right) \cdot B_{\text{Protozoa}}^P + \\ & + \left(\text{Mort}_{\text{Zoopl}}^{\sum P} - \text{Uptake}_{\text{Zoopl}, P_detr} \right) \cdot B_{\text{Zoopl}}^P \end{aligned}$$

скорость изменения концентрации растворенного в воде кислорода -

$$\begin{aligned} \text{Rate}_{O_2} = & -\text{Exchange}_{O_2}(T_w) \cdot (C_{O_2} - C_{O_2}^{\text{sat}}(T_w)) - h_1 \cdot \text{TransfR}_{\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-}(T_w) \cdot C_{\text{NH}_4^+} - \\ & - h_2 \cdot \text{TransfR}_{\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-}(T_w) \cdot C_{\text{NO}_2^-} - h_3 \cdot \text{EXcr}_{\text{Bacteria}}^{\sum N} \cdot B_{\text{Bacteria}}^N - h_4 \cdot \text{EXcr}_{\text{Algae}}^{\sum N} \cdot B_{\text{Algae}}^N - \\ & - h_5 \cdot \text{EXcr}_{\text{Protozoa}}^{\sum N} \cdot B_{\text{Protozoa}}^N - h_6 \cdot \text{EXcr}_{\text{Zoopl}}^{\sum N} \cdot B_{\text{Zoopl}}^N \end{aligned}$$

Расчет концентрации сестона и определения характеристик прозрачности воды

Начальный момент времени

$$C_{\text{Seston}}^{\text{мг/л}} = (8,74 \pm 0,03) \cdot Z_{\text{White}}^{-(1,31 \pm 0,08)} \longrightarrow \epsilon = 1,8/Z_{\text{White}}$$

($r = -0,85$) (Шишкин, 1987)

$$C_{\text{DOM}}^{\text{мг/л}} = (1,0 \pm 0,04) \cdot C_{\text{Seston}}^{(0,31 \pm 0,03)}$$

($r = 0,73$) (Шишкин, 1987)

Принимается, что в ВОВ 50% углерода
(Никулина, 1987)

$$C_{\text{DOM}}^{\text{C}}^{\text{мг/л}} = 0,5 \cdot C_{\text{DOM}}^{\text{мг/л}}$$

$$C_{\text{N-detr}}^{\text{мг/л}}$$

$$C_{\text{P-detr}}^{\text{мг/л}}$$

Принимается, что отношение C : N : P в детрите равно 40 : 10 : 1

$$C_{\text{C-detr}}^{\text{мг/л}} = 0,85 \cdot C_{\text{DOM}}^{\text{C}}^{\text{мг/л}}$$

Концентрация углерода в составе детрита

Принимается, что детрит составляет 80-85 % ВОВ
(Шишкин, 1987)

Расчет концентрации сестона и определения характеристик прозрачности воды

После каждого шага вычислений по времени

$$C_{N_detr}$$

Концентрация углерода в составе детрита

$$C_{C_detr} = 4,0 \cdot C_{N_detr}$$

Концентрация углерода в составе ВОВ

$$C_{POM}^C = C_{C_detr} / 0,85$$

$$\varepsilon = 1,8 / Z_{White}$$

Коэффициент экстинкции

$$Z_{White} = (8,74 / C_{Seston})^{1/1.31}$$

Глубина видимости белого диска

$$C_{Seston} = (3,23 \pm 0,08) \cdot C_{POM}^{(1,73 \pm 0,19)}$$

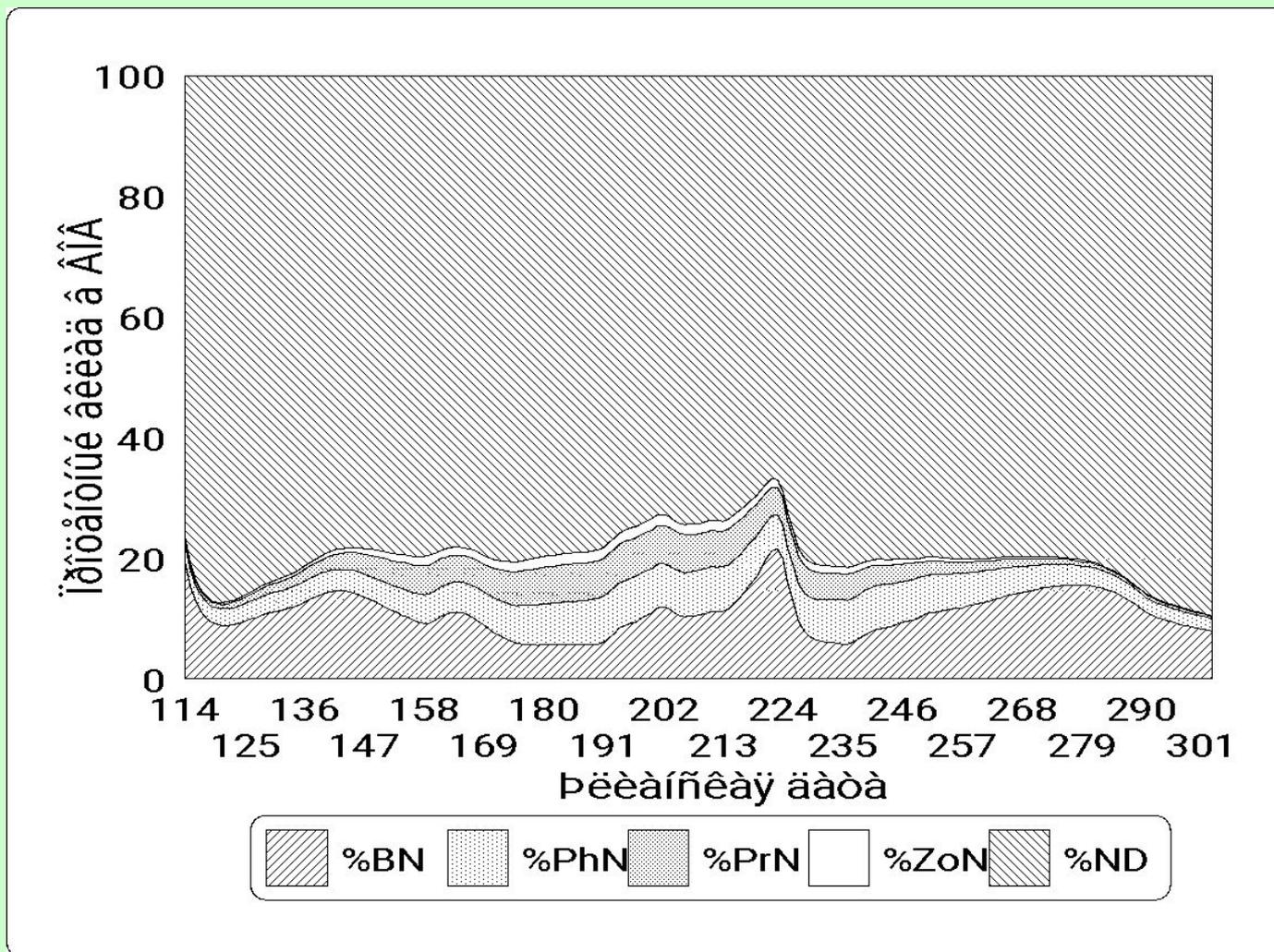
Концентрация сестона в воде

$$C_{POM} = 2,0 \cdot C_{POM}^C$$

Концентрация ВОВ

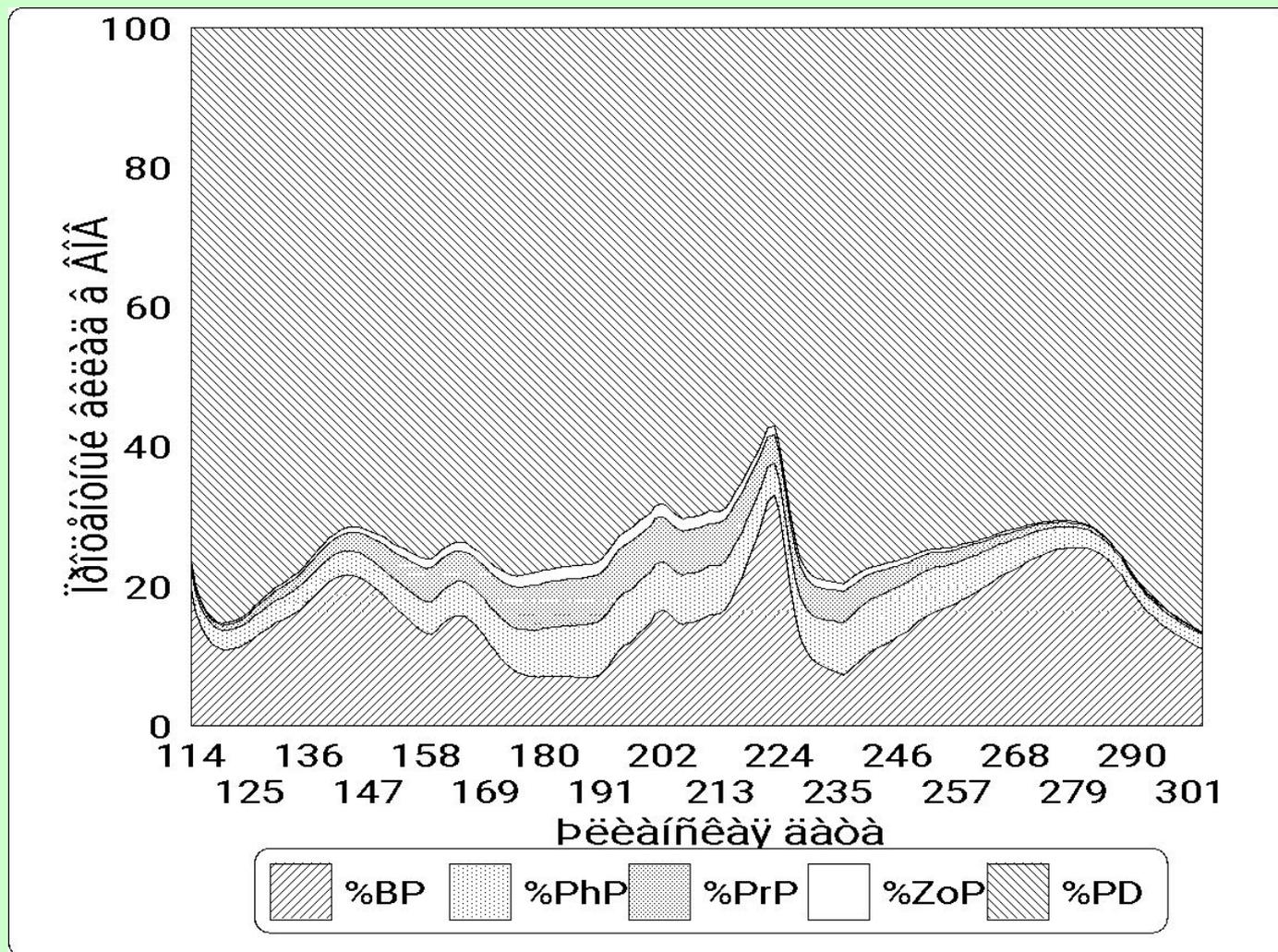
Процентный вклад компонентов во взвешенном органическом веществе (данные моделирования)

Цикл азота, 1984 год



Процентный вклад компонентов во взвешенном органическом веществе (данные моделирования)

Цикл фосфора, 1984 год



Средние за сезон величины времени оборота химических и биологических компонентов экосистемы (в сутках)

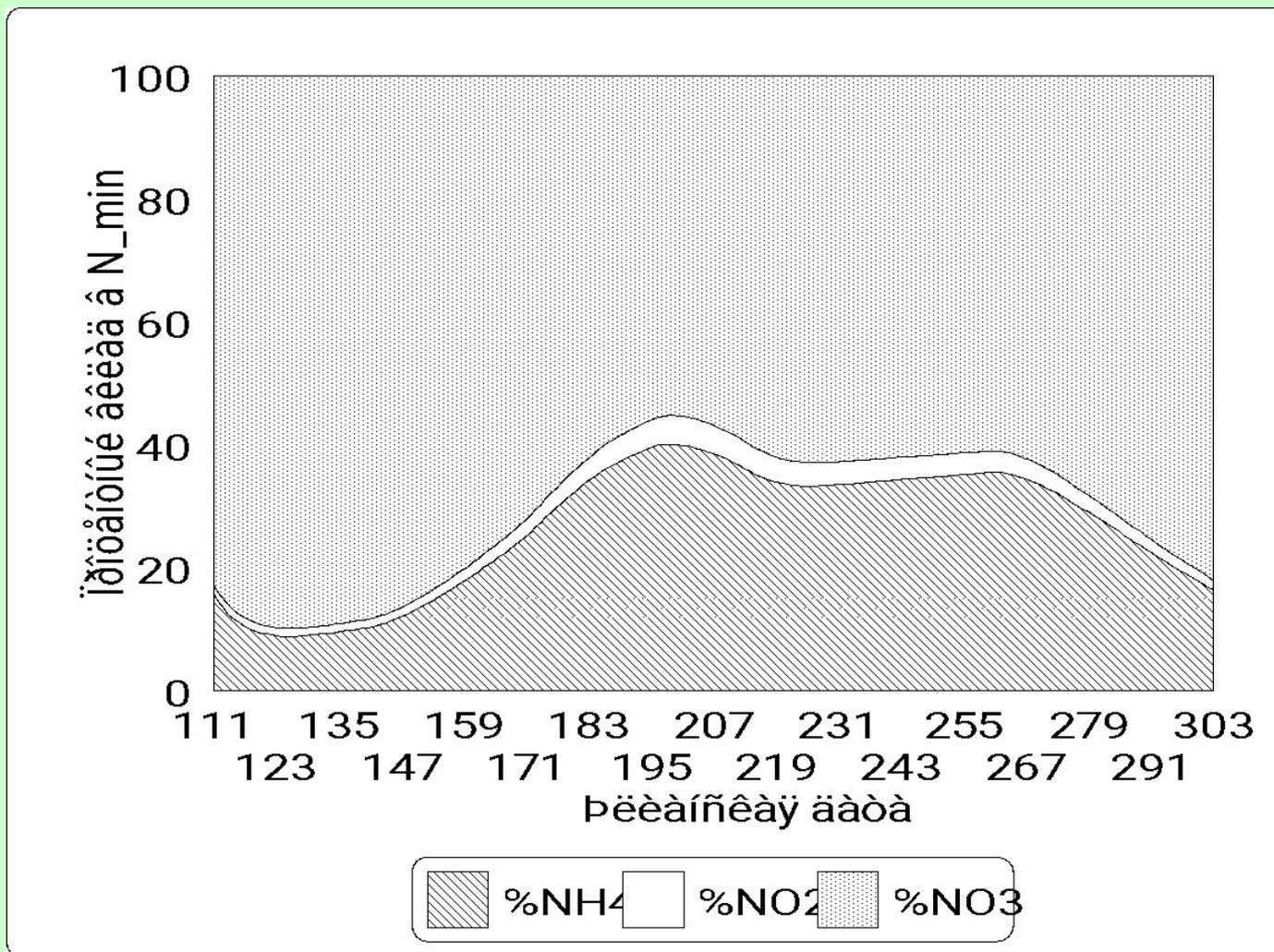
	1984	1985	1986	1987
B_N	0.99	0.81	0.76	0.65
B_P	1.14	0.75	0.86	0.65
Ph_N	2.82	4.17	3.80	3.76
Ph_P	2.71	3.13	3.79	2.93
Pr_N	1.62	1.61	0.81	1.11
Pr_P	1.60	1.59	0.82	1.08
Zoo_N	1.74	2.21	2.11	2.65
Zoo_P	1.64	2.18	2.10	3.12

Средние за сезон величины времени оборота химических и биологических компонентов экосистемы (в сутках)

	1984	1985	1986	1987
DON	3.43	3.60	3.71	3.17
NH4	3.33	3.73	3.51	3.27
NO2	1.99	1.93	1.79	1.85
NO3	3.60	3.93	4.01	3.48
ND	3.04	3.11	2.98	2.71
DOP	2.08	2.21	1.60	1.72
DIP	3.55	3.70	3.91	3.35
PD	2.71	3.10	3.00	2.51

Процентный вклад минеральных компонентов азота (данные моделирования)

Цикл азота, 1986 год

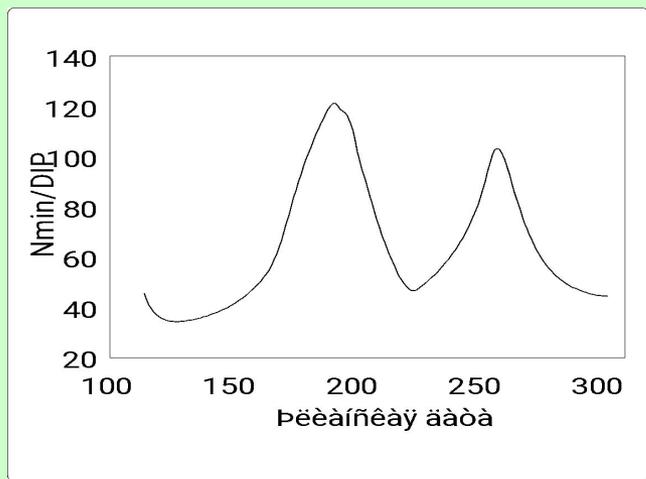


Пределы пространственной изменчивости средних концентраций некоторых химических показателей качества воды Невской губы по данным расчетов по модели и непосредственных наблюдений в разные годы

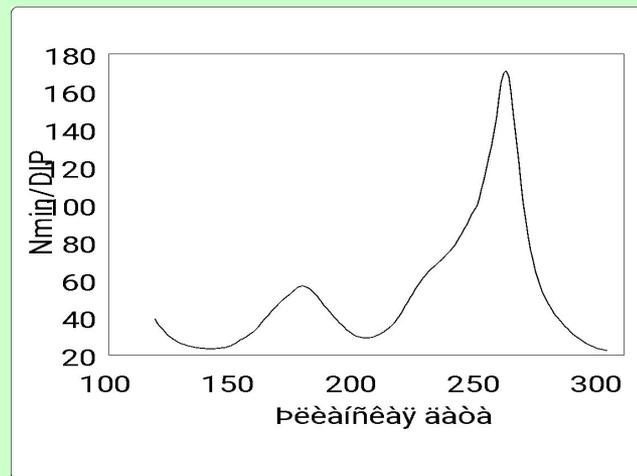
Гидрохимический показатель, размерность	1984–1987 гг. Расчеты по модели	1982–1992 гг. Наблюдения	1993–1996 гг. Наблюдения
NH_4^+ , мкг N/л	10-200	55.1-241.5	32-157
NO_2^- , мкг N/л	3.5-18	2.9-50.9	2.5-11.2
NO_3^- , мкг N/л	170-405	171.5-1216.1	61-396
N_{tot} , мкг N/л	790-1506	663.3-1785.1	542-1095
DIP, мкг P/л	0.05-19.9	2.9-24.9	5.0-28.0
DOP, мкг P/л	1.2-27.1	3.7-8.9	5.0-23.0
O_2^* , %	53.1-91.1	82.0-102.3	55.8-167.3

Внутригодовая изменчивость отношения N_{min}/DIP (данные моделирования)

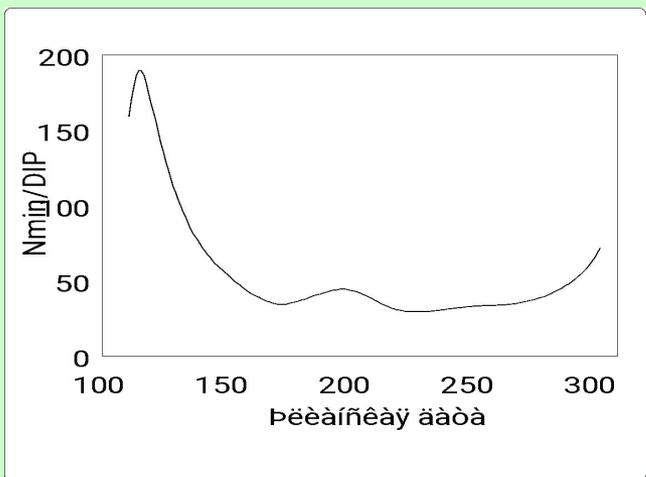
1984 год



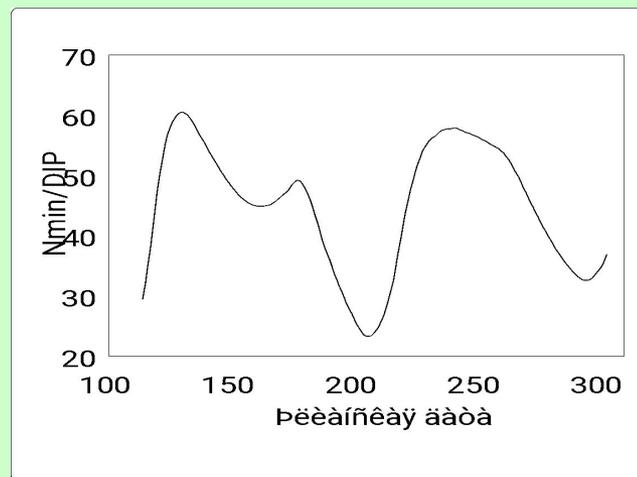
1985 год



1986 год

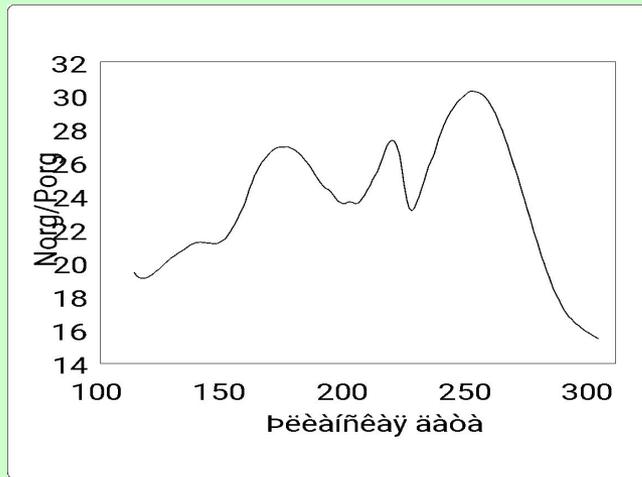


1987 год

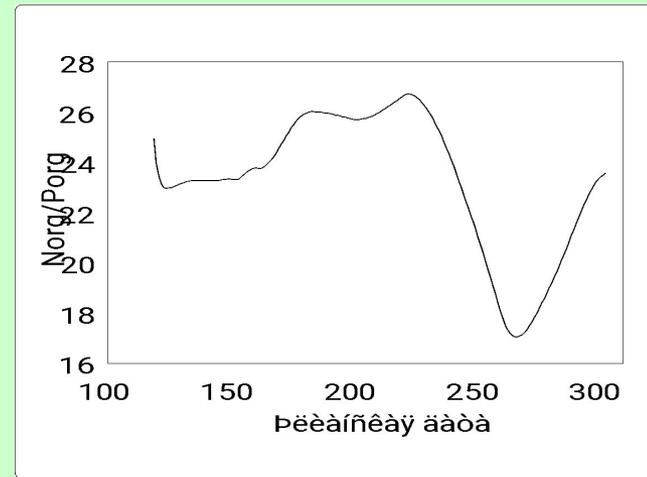


Внутригодовая изменчивость отношения N_{org}/P_{org} (данные моделирования)

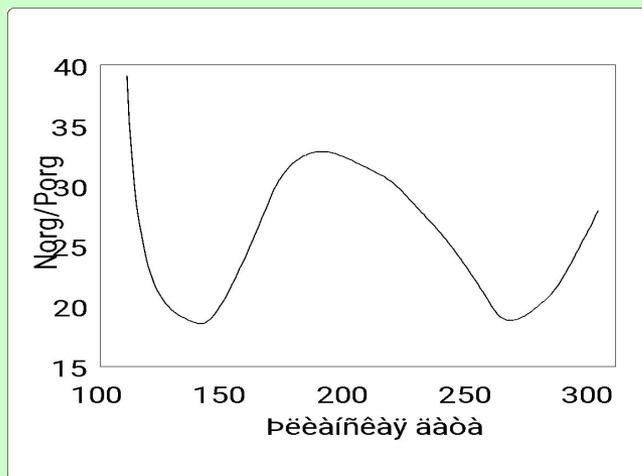
1984 год



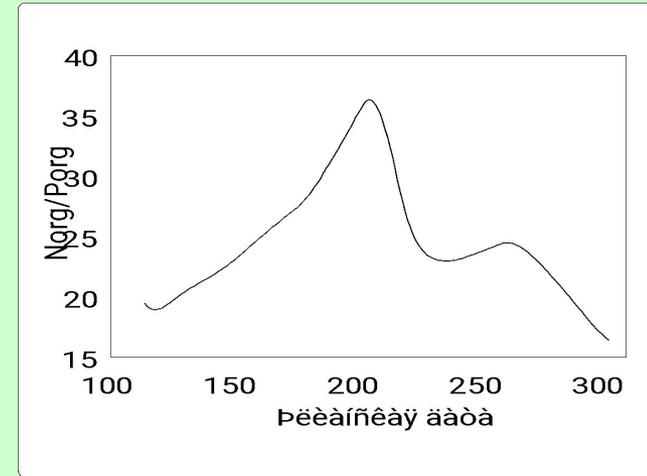
1985 год



1986 год

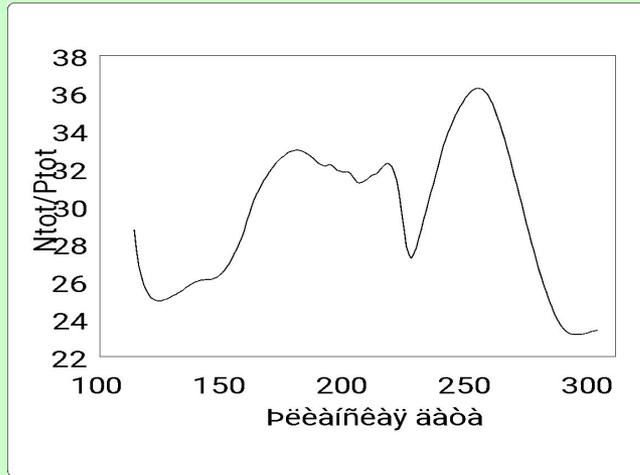


1987 год

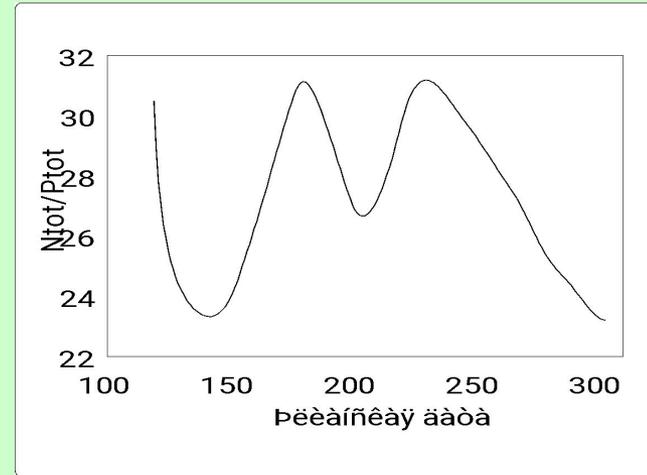


Внутригодовая изменчивость отношения N_{tot}/P_{tot} (данные моделирования)

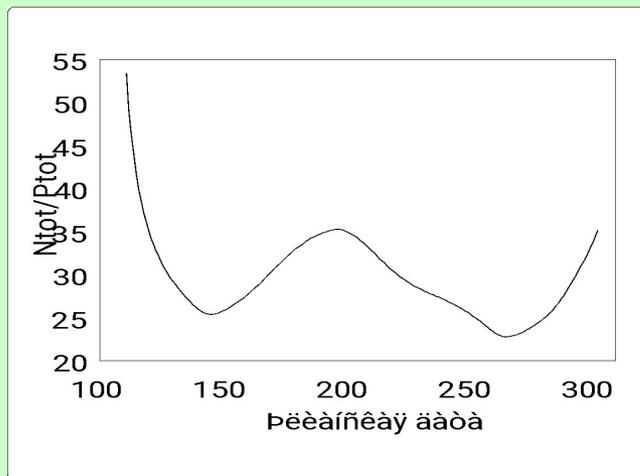
1984 год



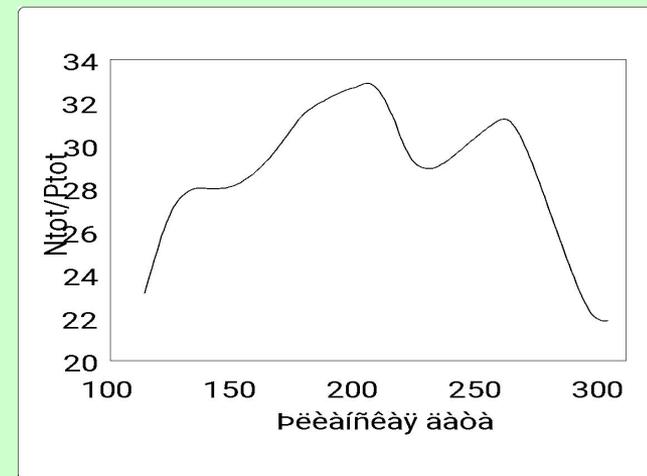
1985 год



1986 год



1987 год



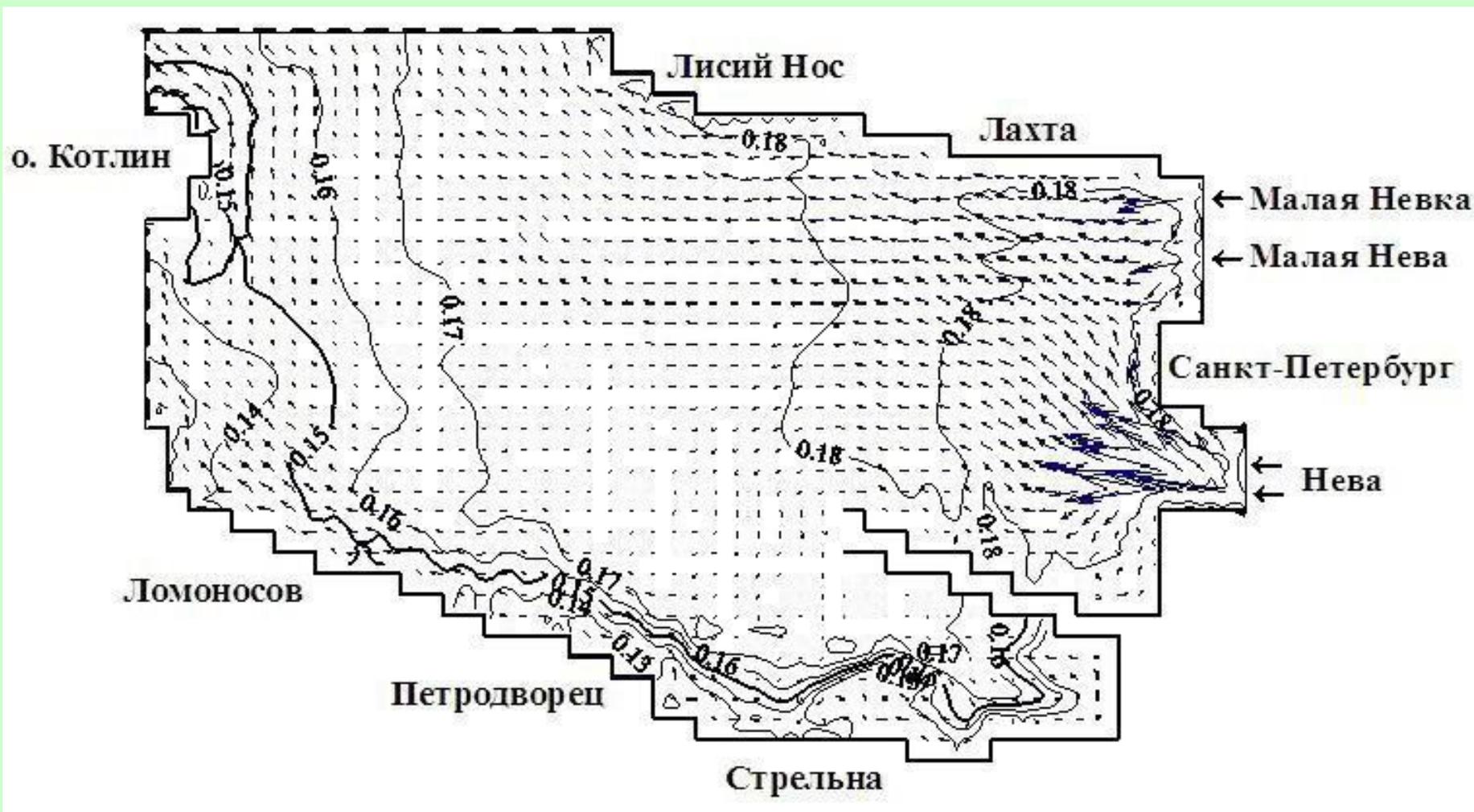
Примеры модельных полей химических и биологических компонентов модели

**Для построения полей химических и биологических
компонентов модели
в пределах расчетной области
нами использовался пакет
Surfer, v. 8.05 (Golden Software, Inc.)**

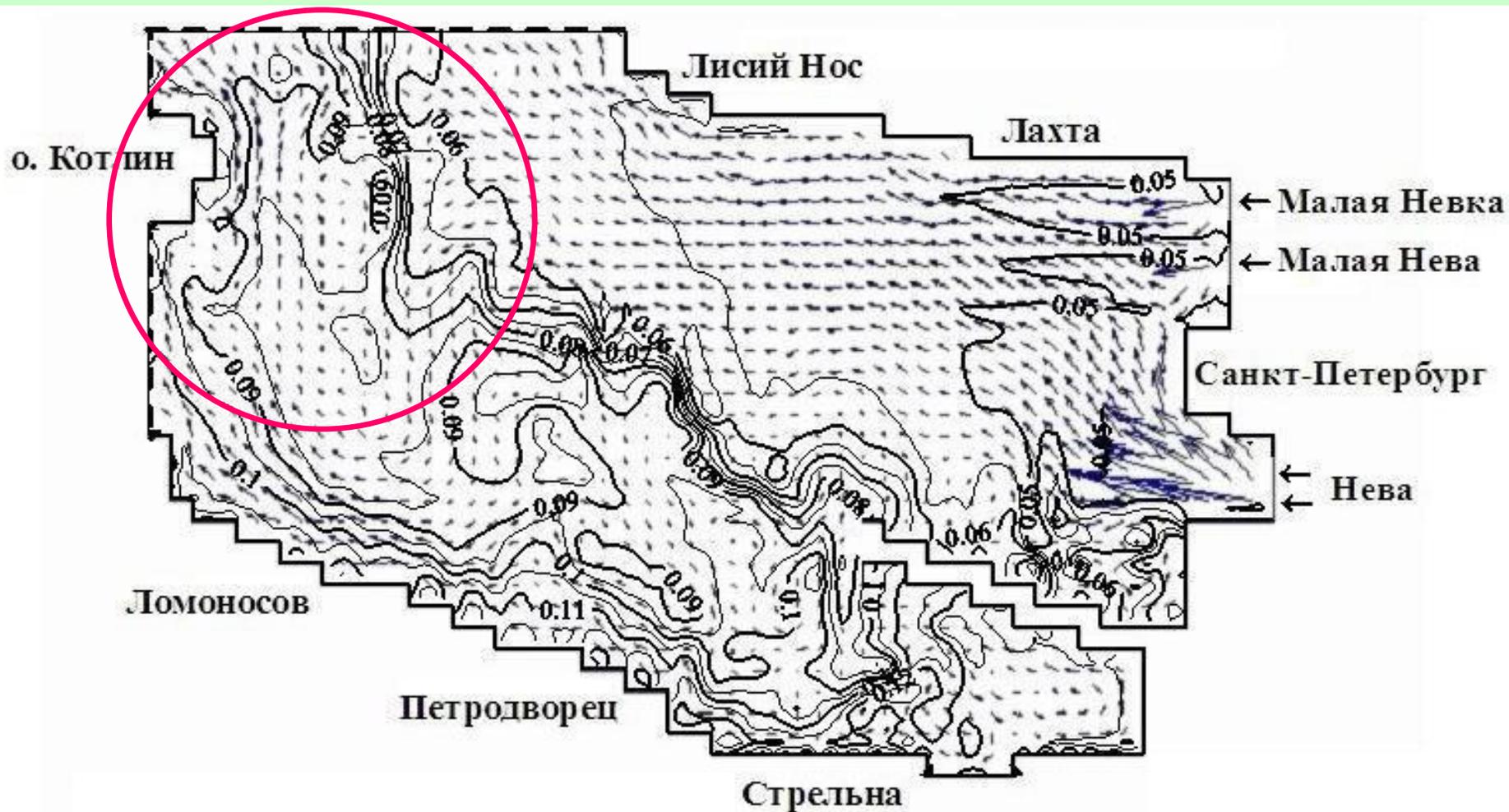
Средние по биотическим компонентам экосистемы критерии Тейла

Год/Месяц	V	VI	VII	VIII	IX	X
1984 0.2768	0.2367	0.2372	0.2439	0.3101	0.3599	0.2728
1985 0.2828	0.2975	0.3374	0.2058	0.3003	0.3251	0.2306
1986 0.2948	0.3778	0.2636	0.2879	0.2780	0.2808	0.2805
1987 0.2702	0.2380	0.2695	0.3265	0.2919	0.2627	0.2325

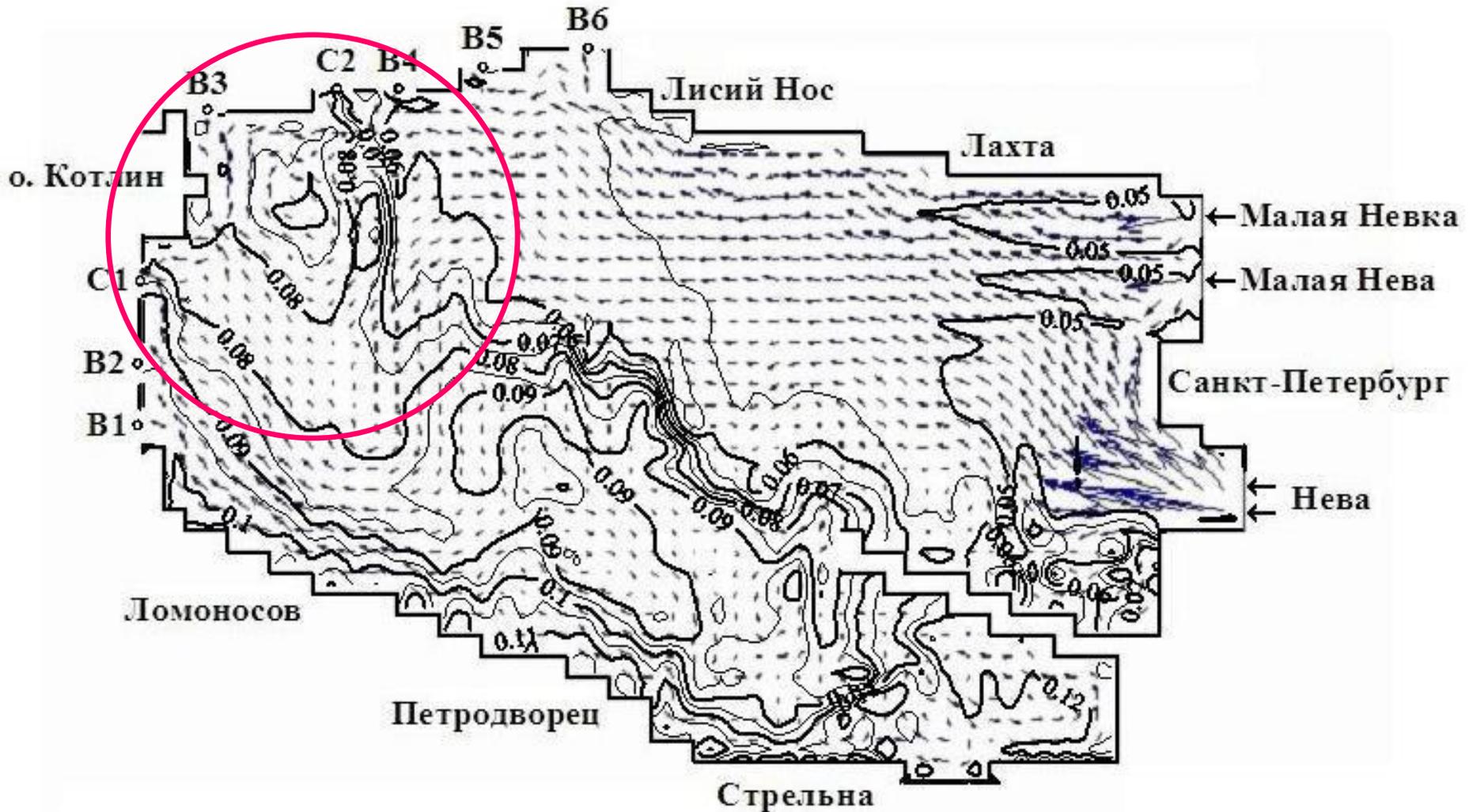
Пример пространственного распределения концентраций NH_4^+ ,
мгN/л, на 15.07.86



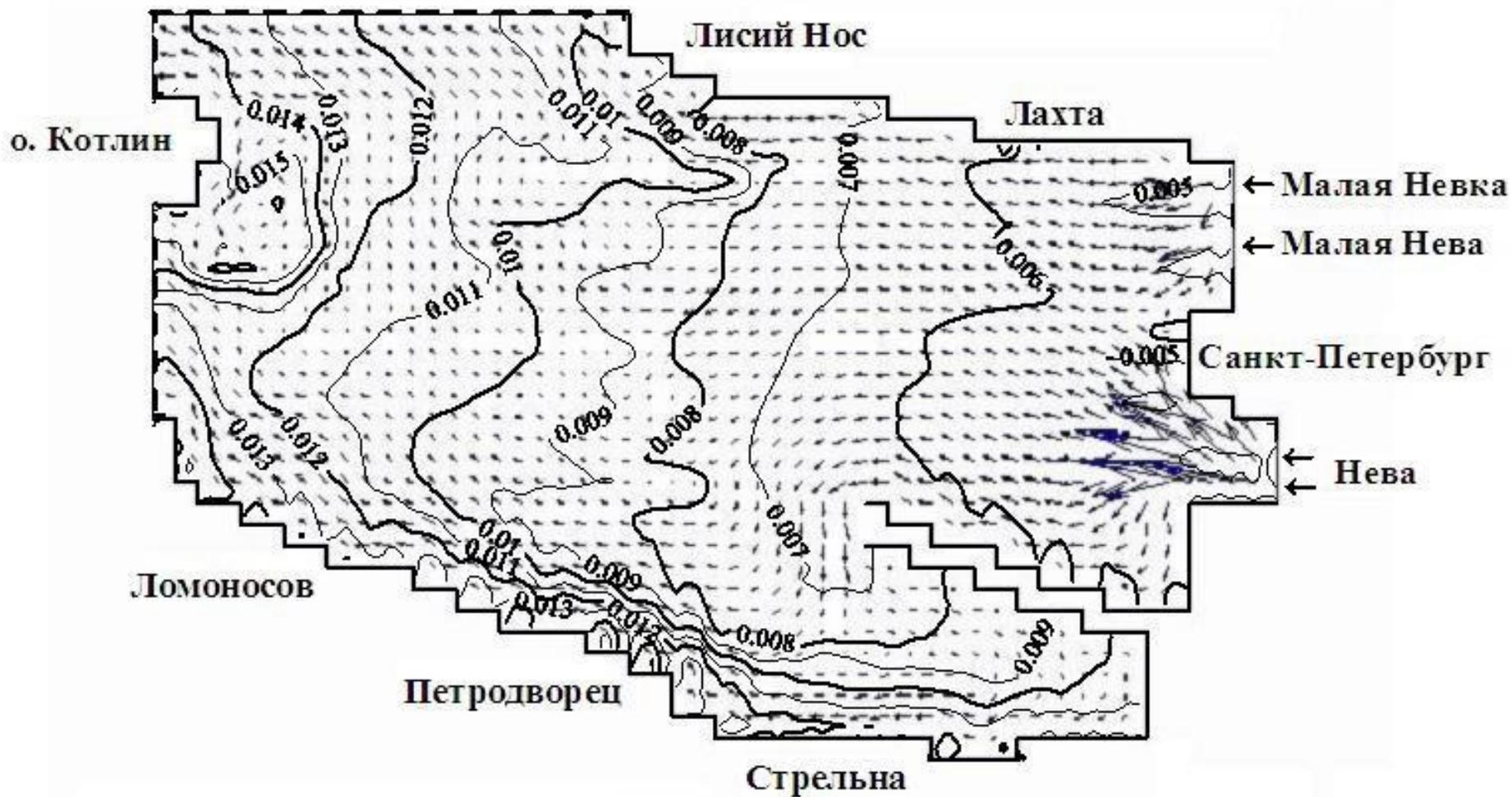
Пример пространственного распределения концентраций NH_4^+ ,
мгN/л, на 20.10.87



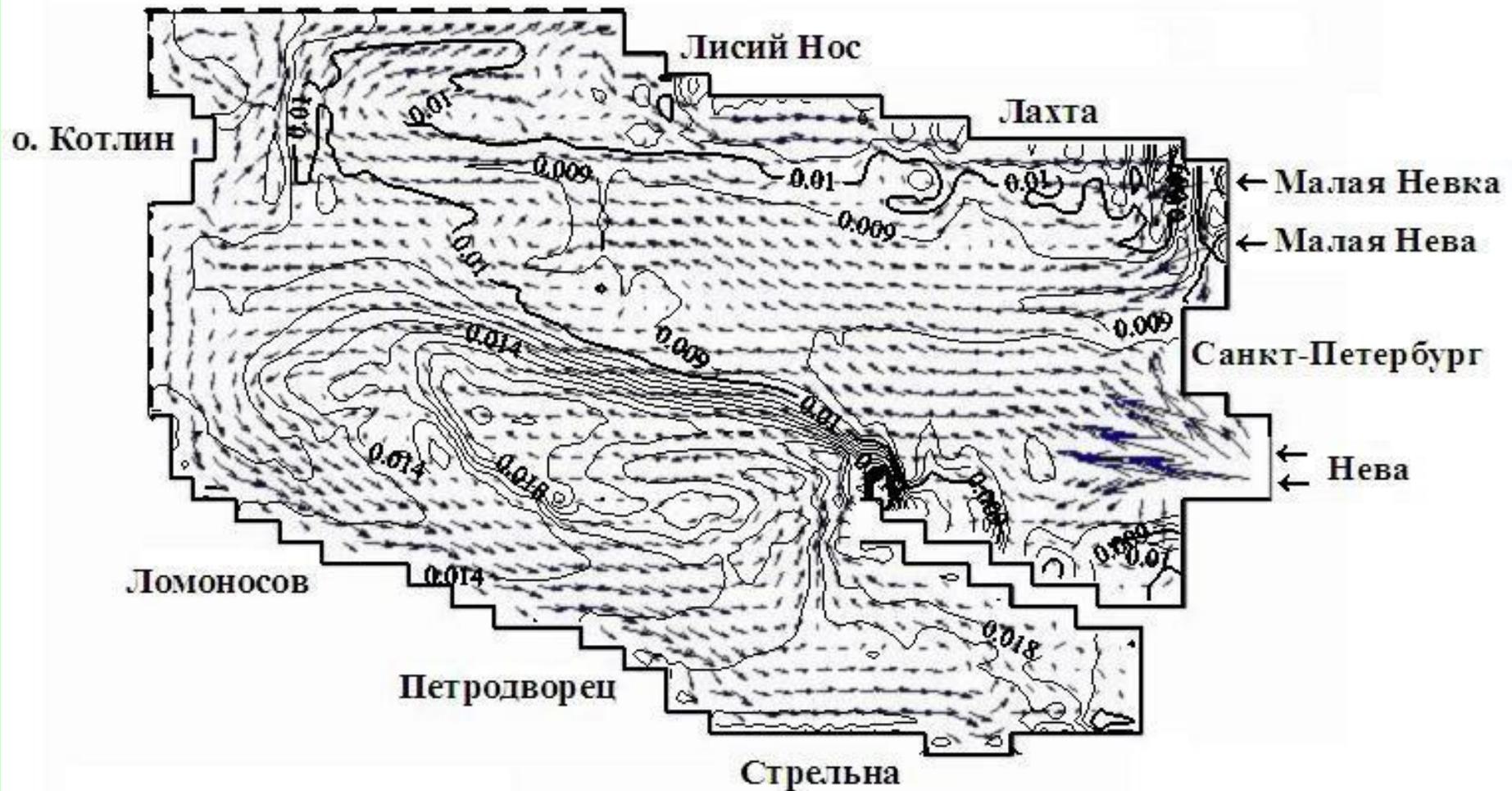
Пример пространственного распределения концентраций NH_4^+ , мгN/л, на 20.10.87 (проектные условия)



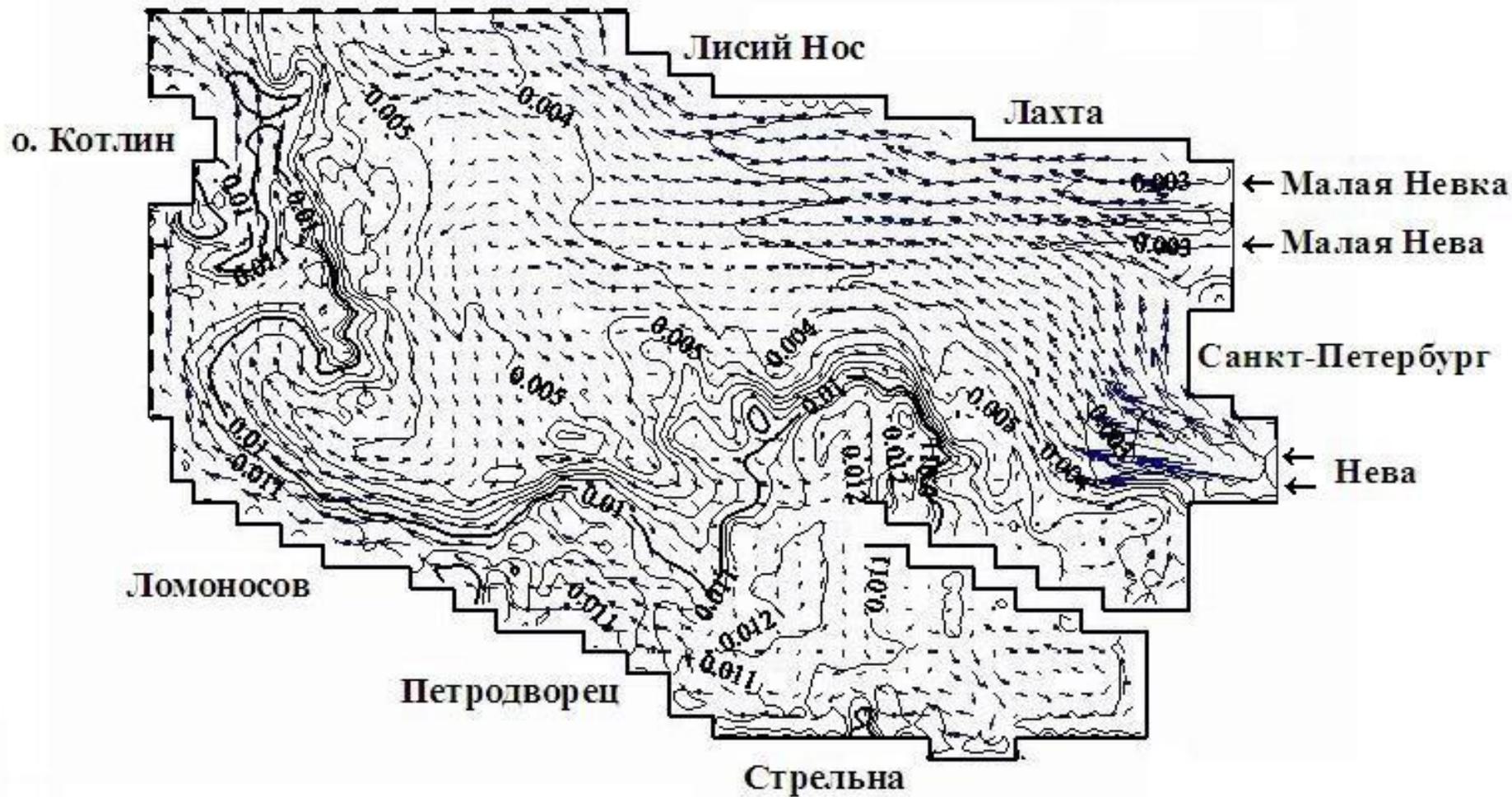
Пример пространственного распределения концентраций NO_2^- ,
мгN/л, на 20.05.84



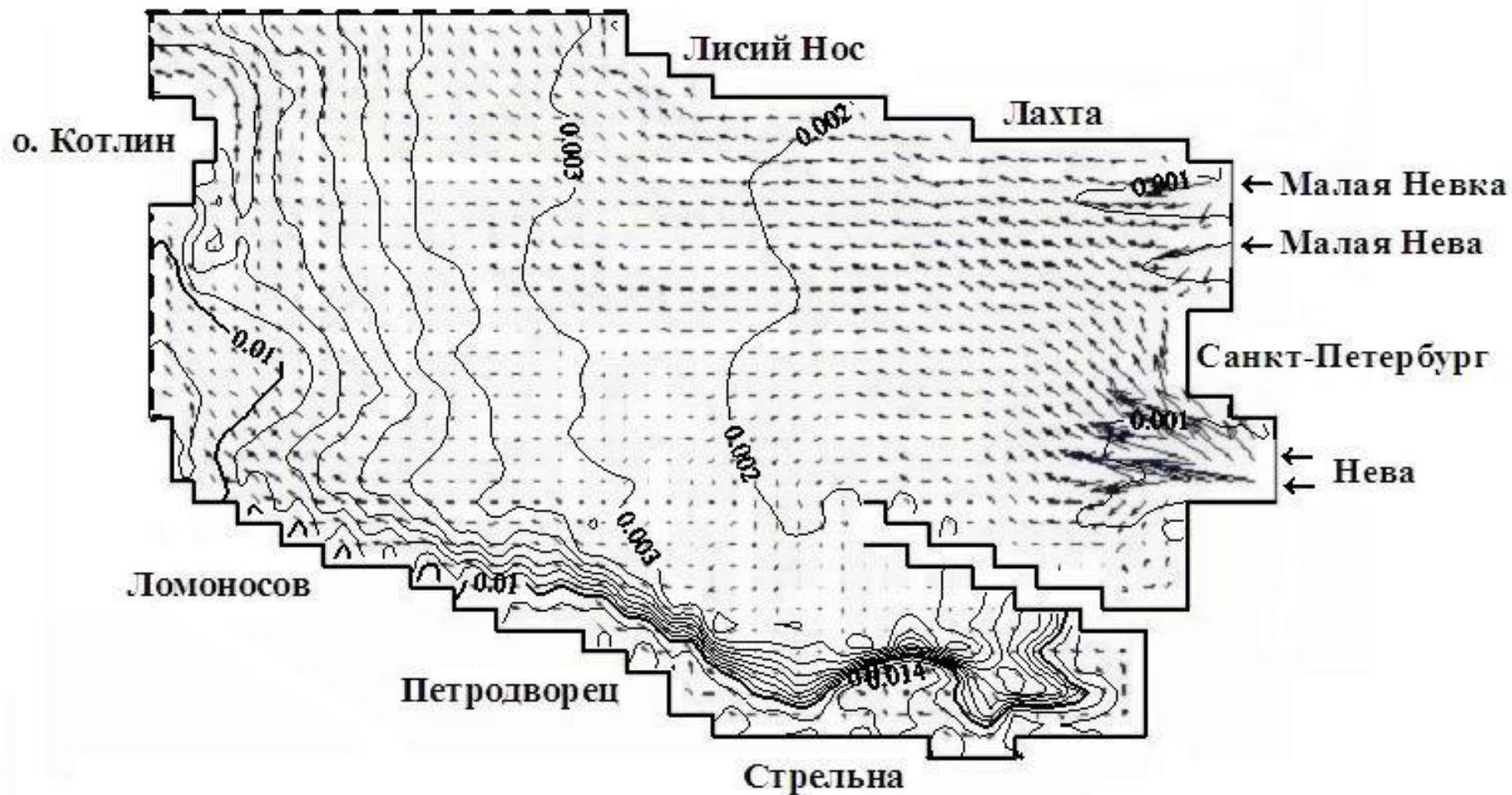
Пример пространственного распределения концентраций NO_2^- ,
мгN/л, на 04.08.86



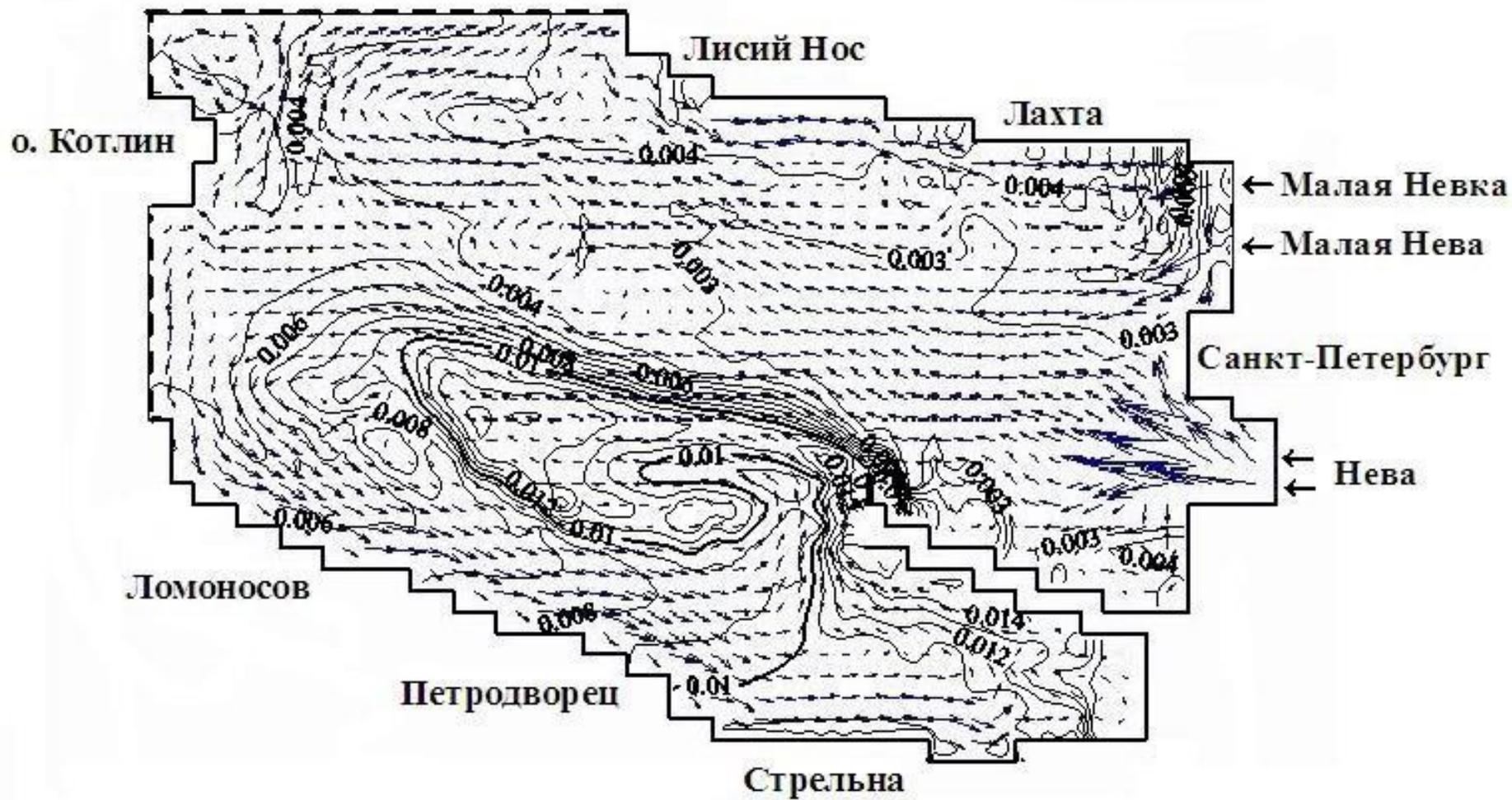
Пример пространственного распределения концентраций NO_2^- ,
мгN/л, на 20.10.86



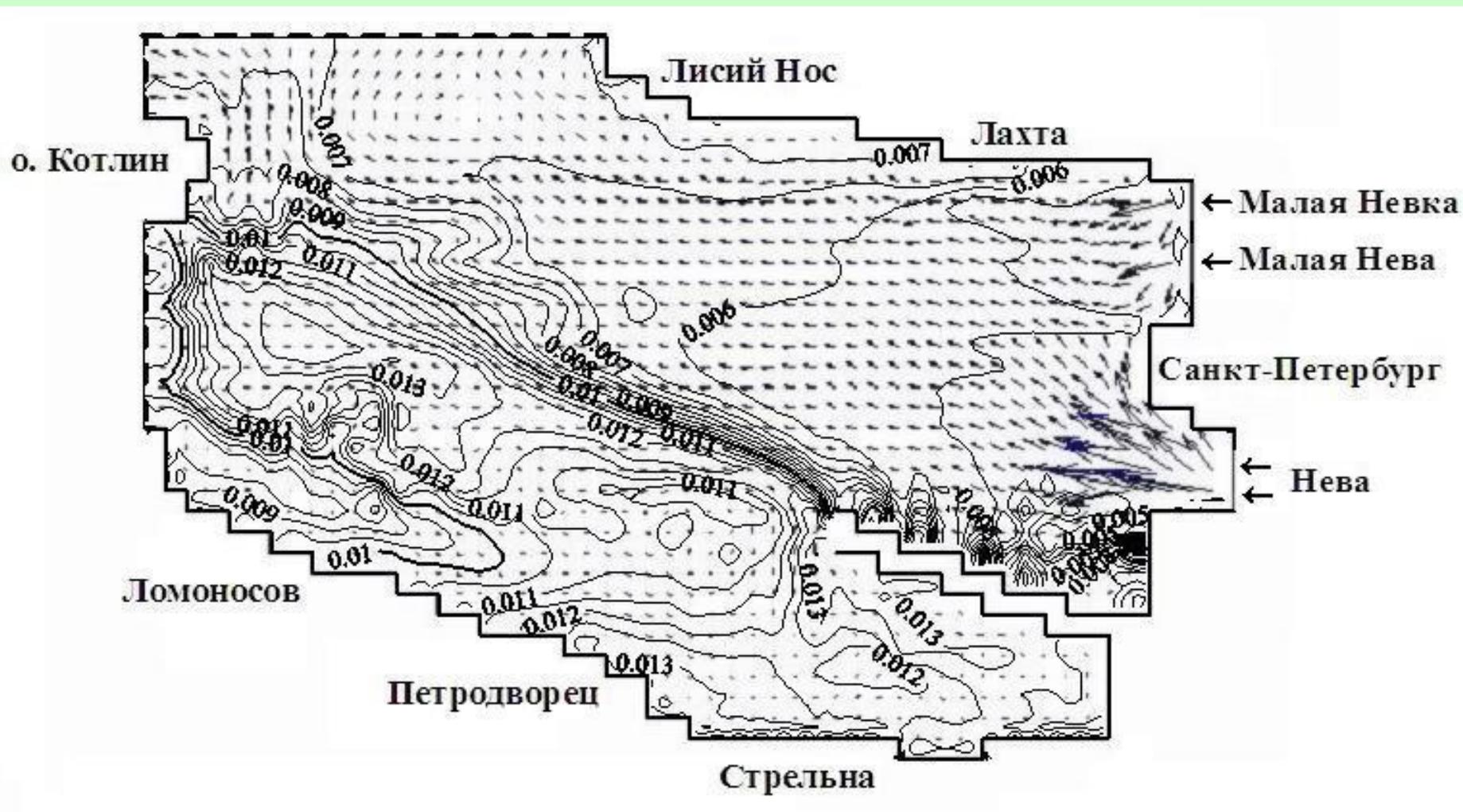
Пример пространственного распределения концентраций DIP,
мгР/л, на 15.07.86



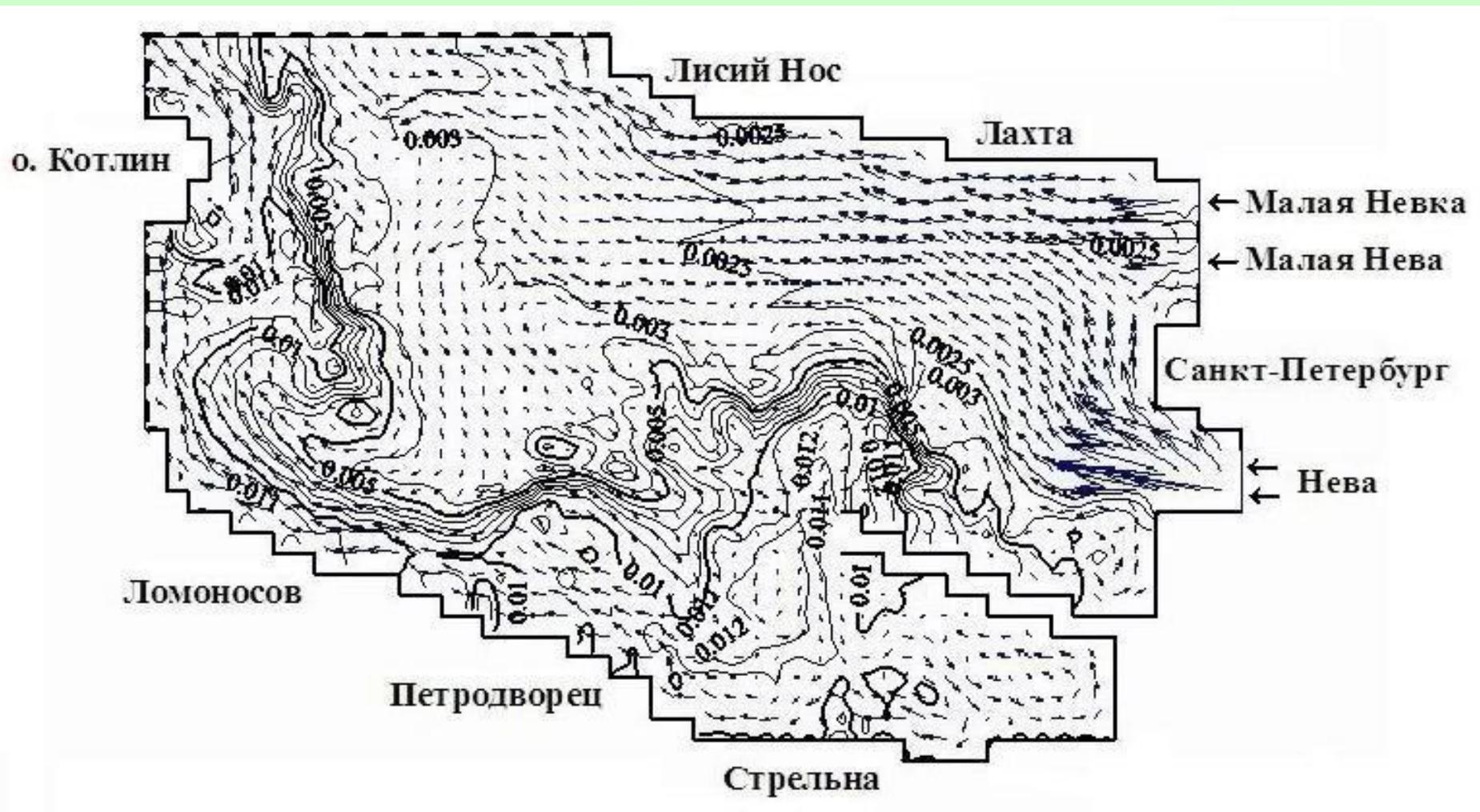
Пример пространственного распределения концентраций DIP,
мгР/л, на 04.08.86



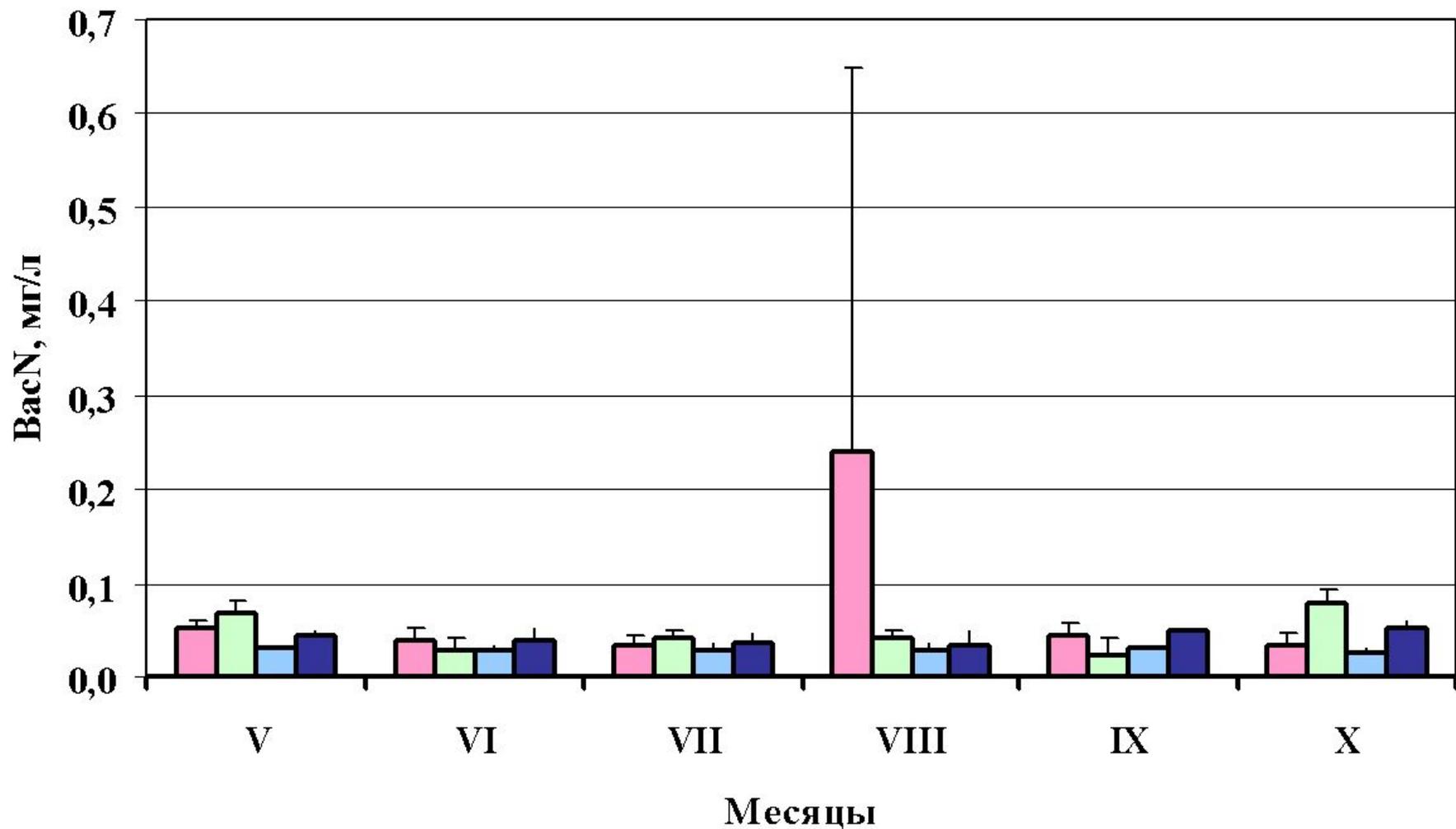
Пример пространственного распределения концентраций DIP,
мгР/л, на 18.09.86



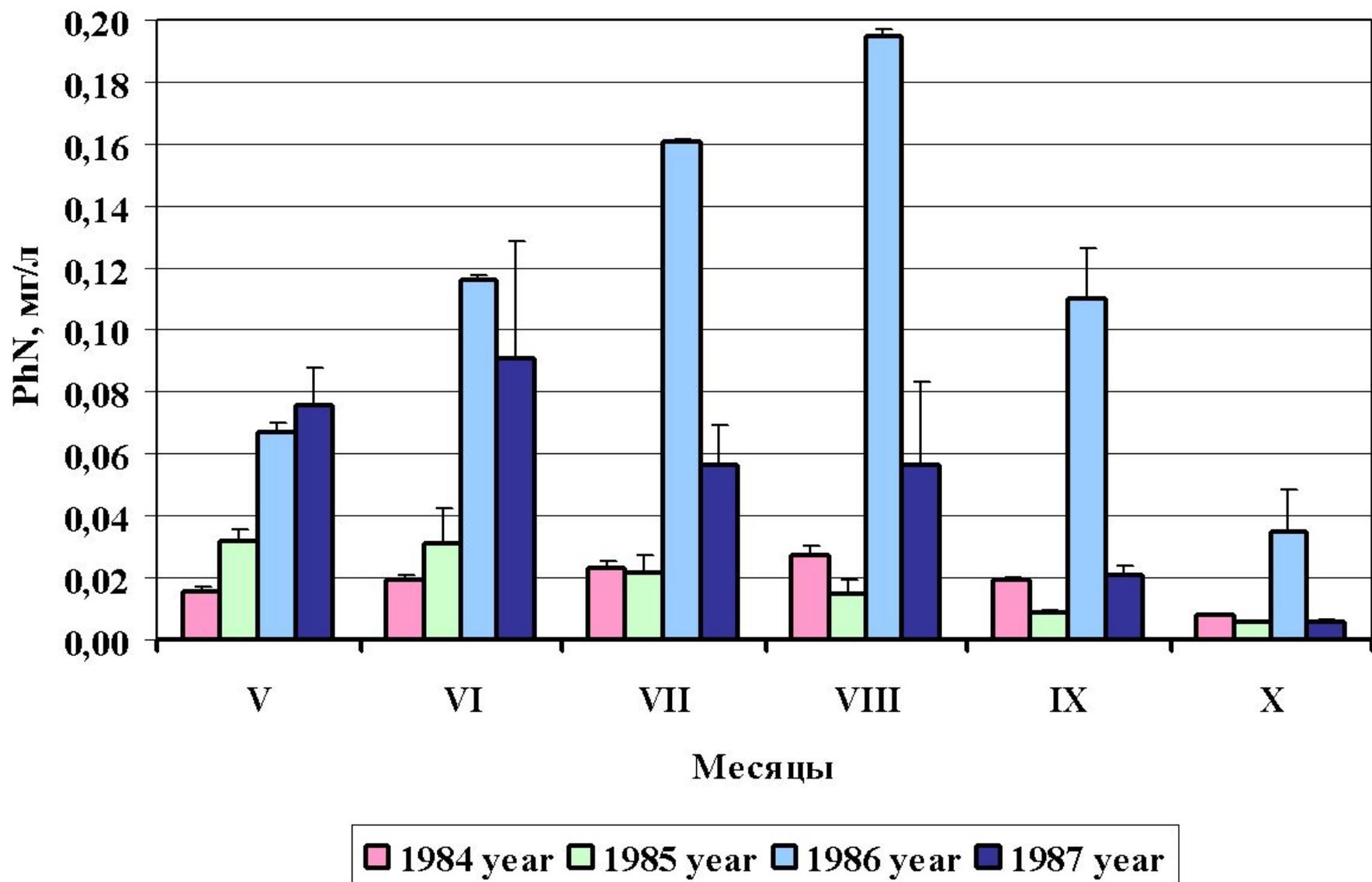
Пример пространственного распределения концентраций DIP,
мгР/л, на 20.10.86

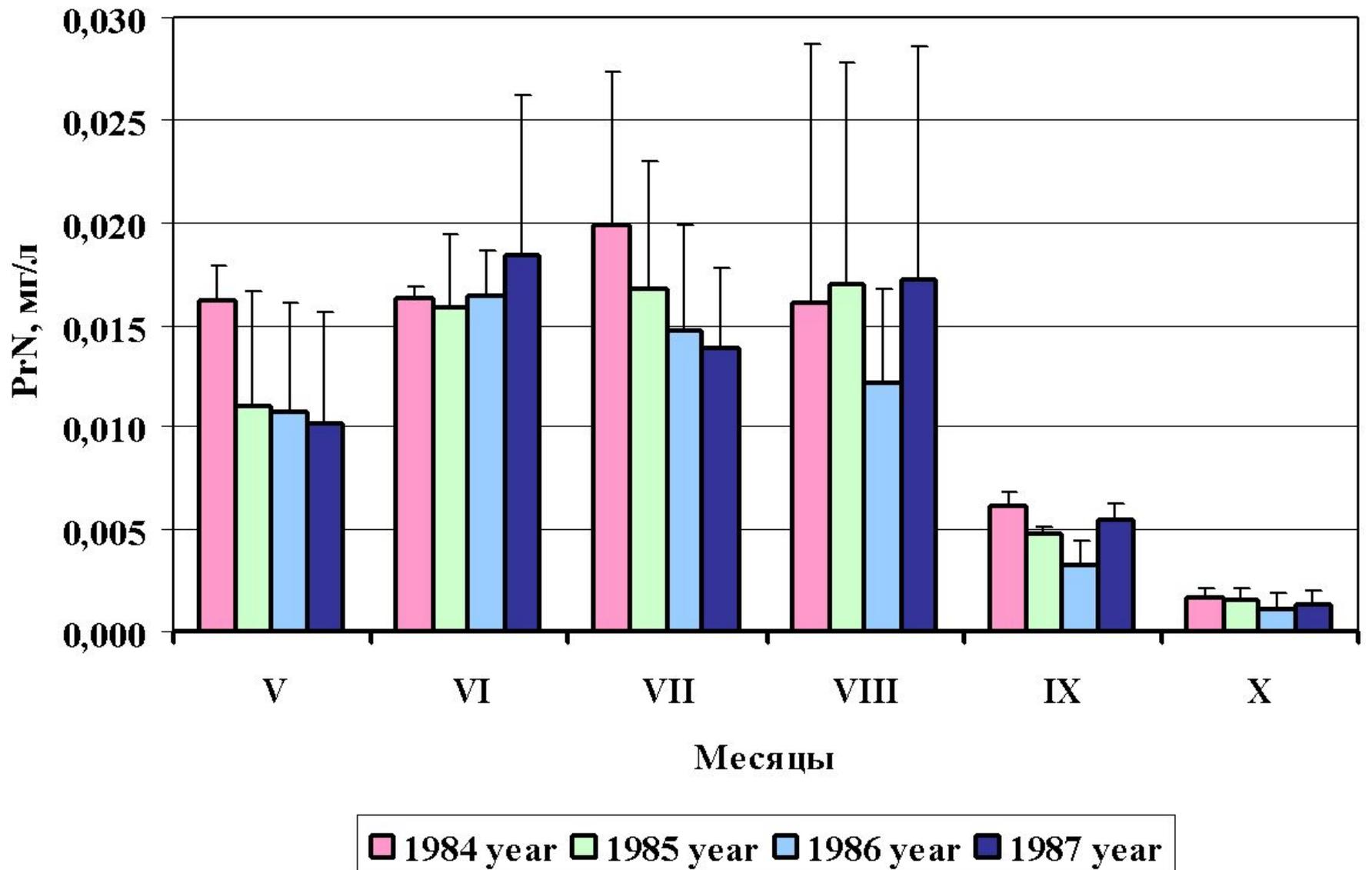


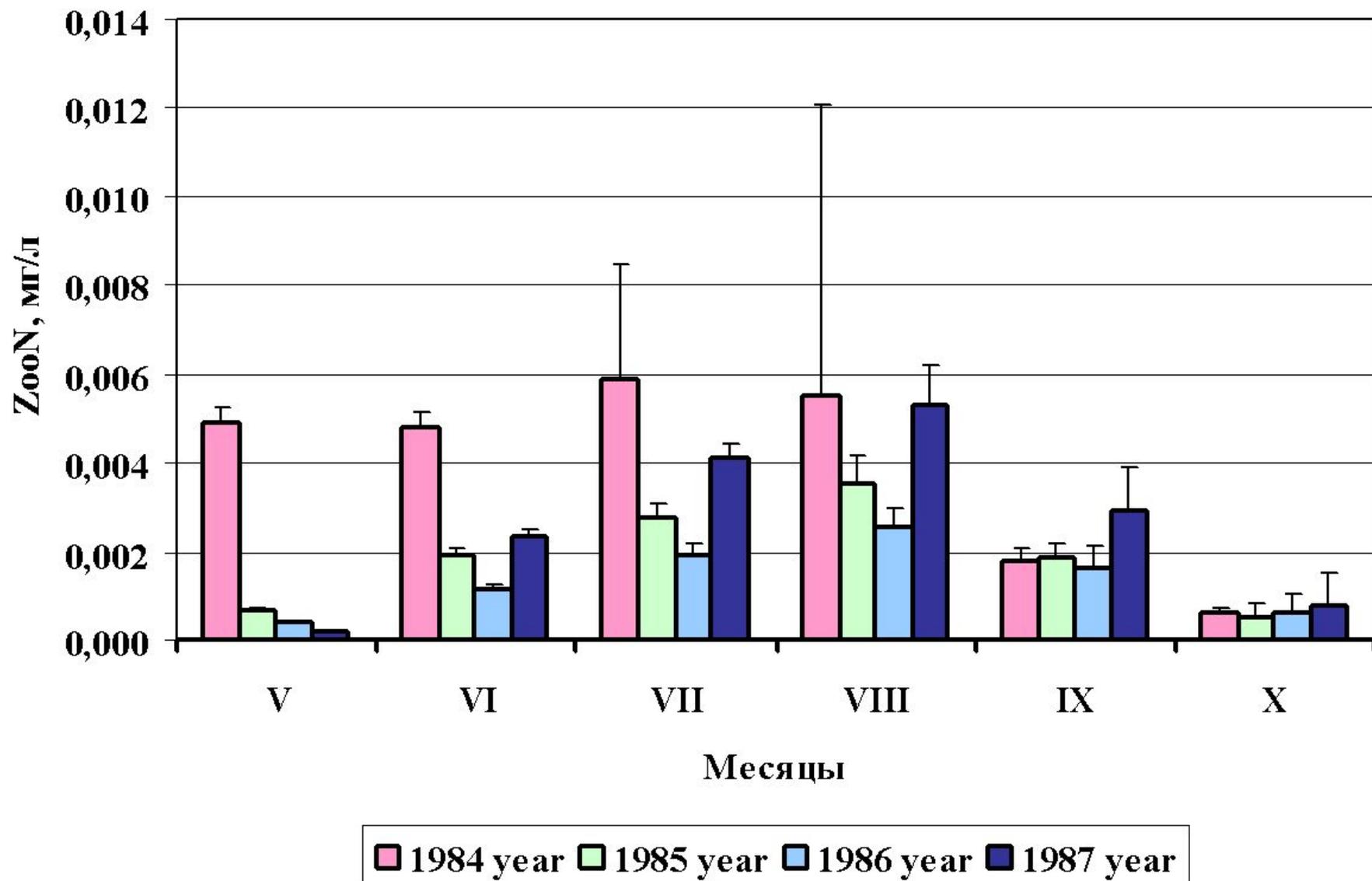
**Временная изменчивость распределения
рассчитанных по модели концентраций
компонентов экосистемы в пределах
акватории Невской губы на моменты
проведения гидрологических
и гидрохимических съемок**

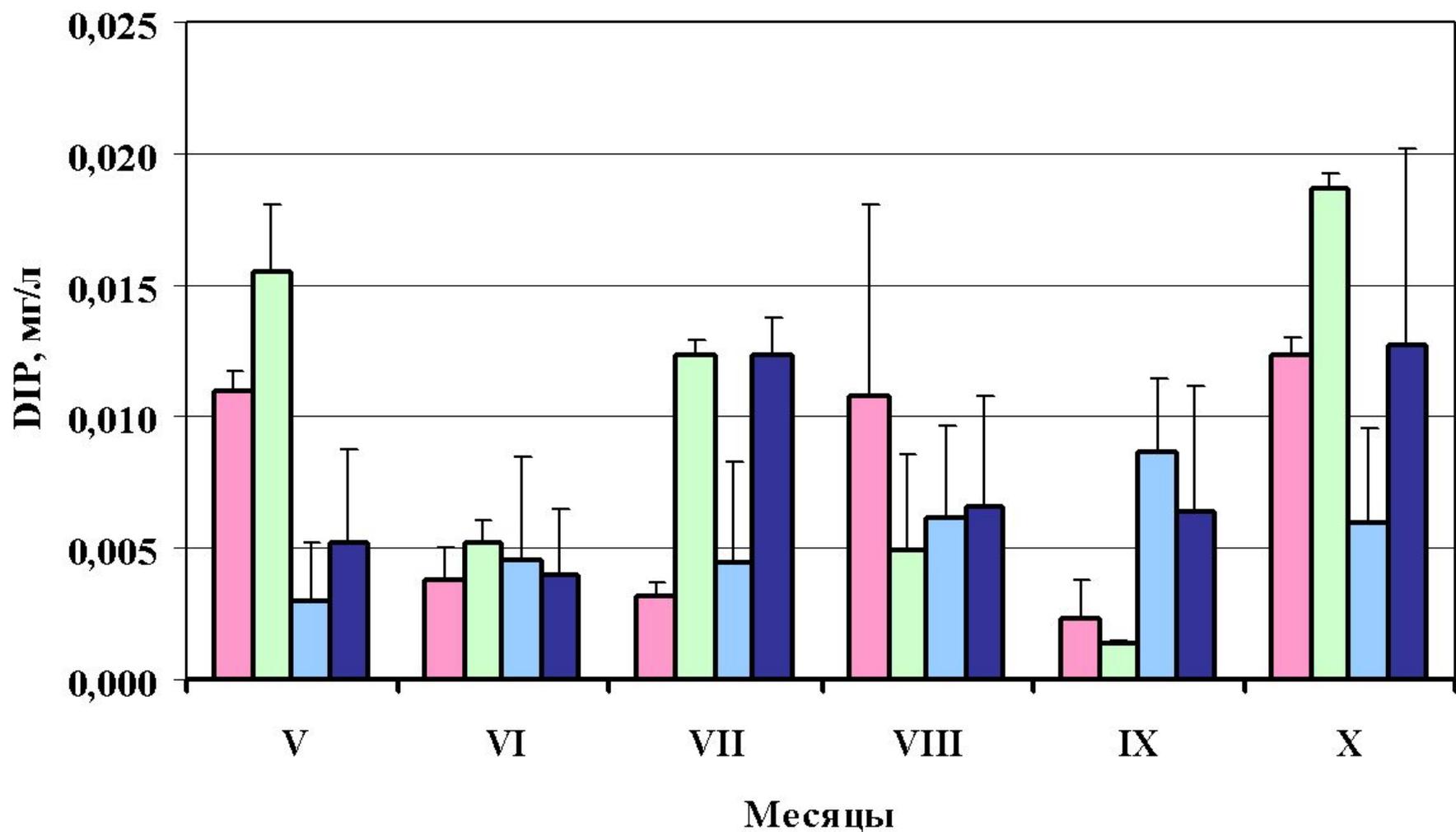


■ 1984 year ■ 1985 year ■ 1986 year ■ 1987 year

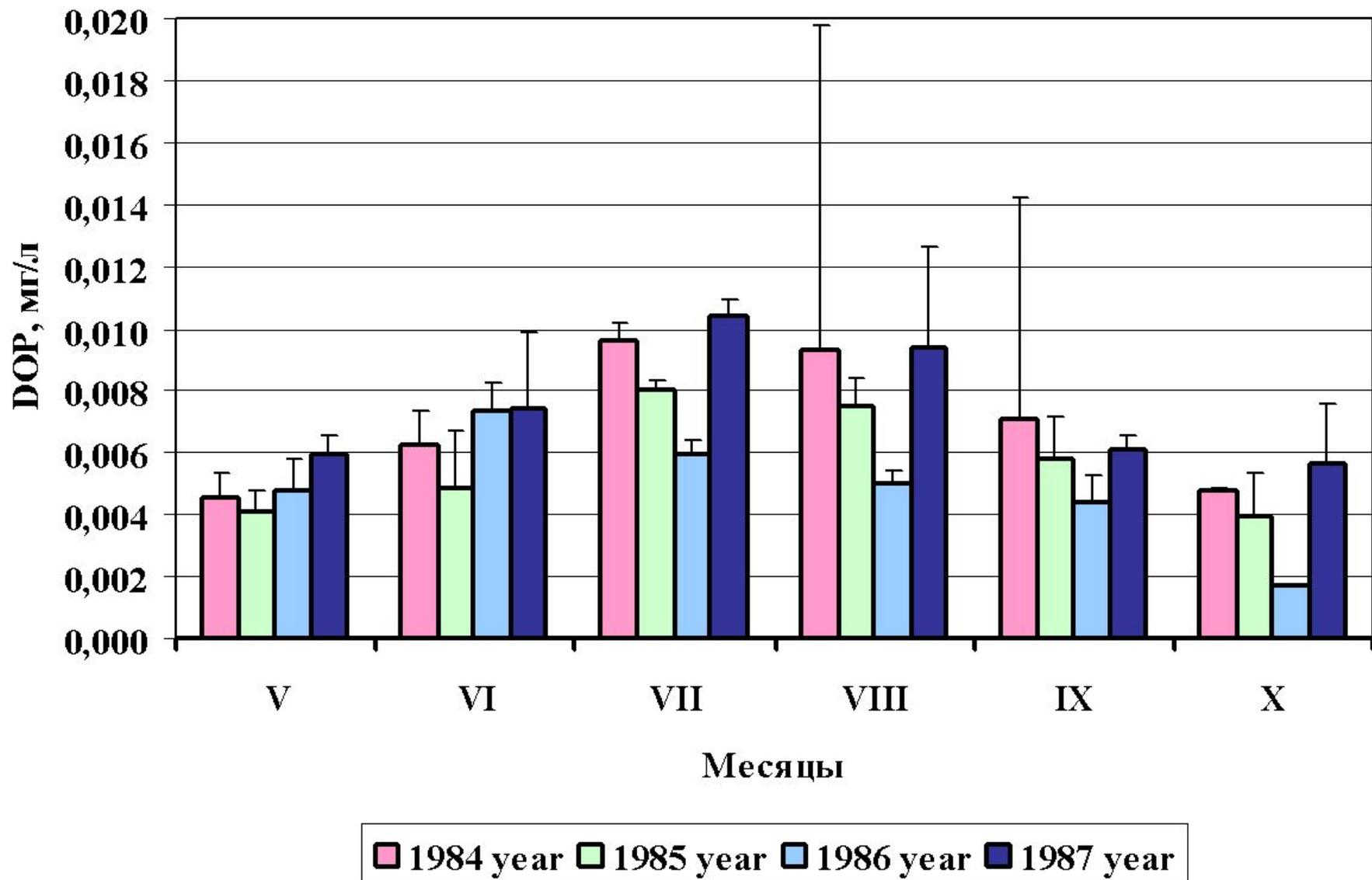


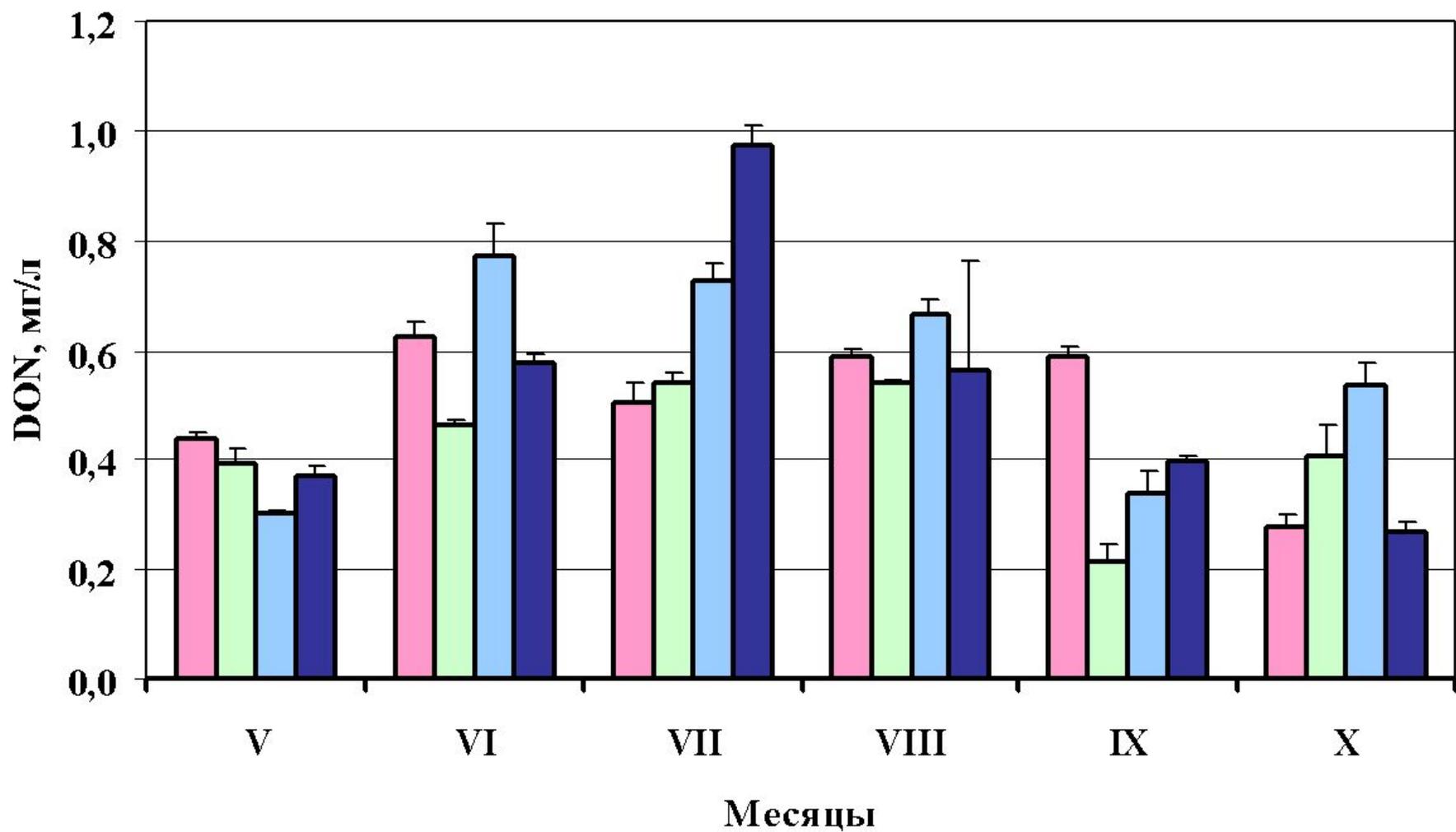




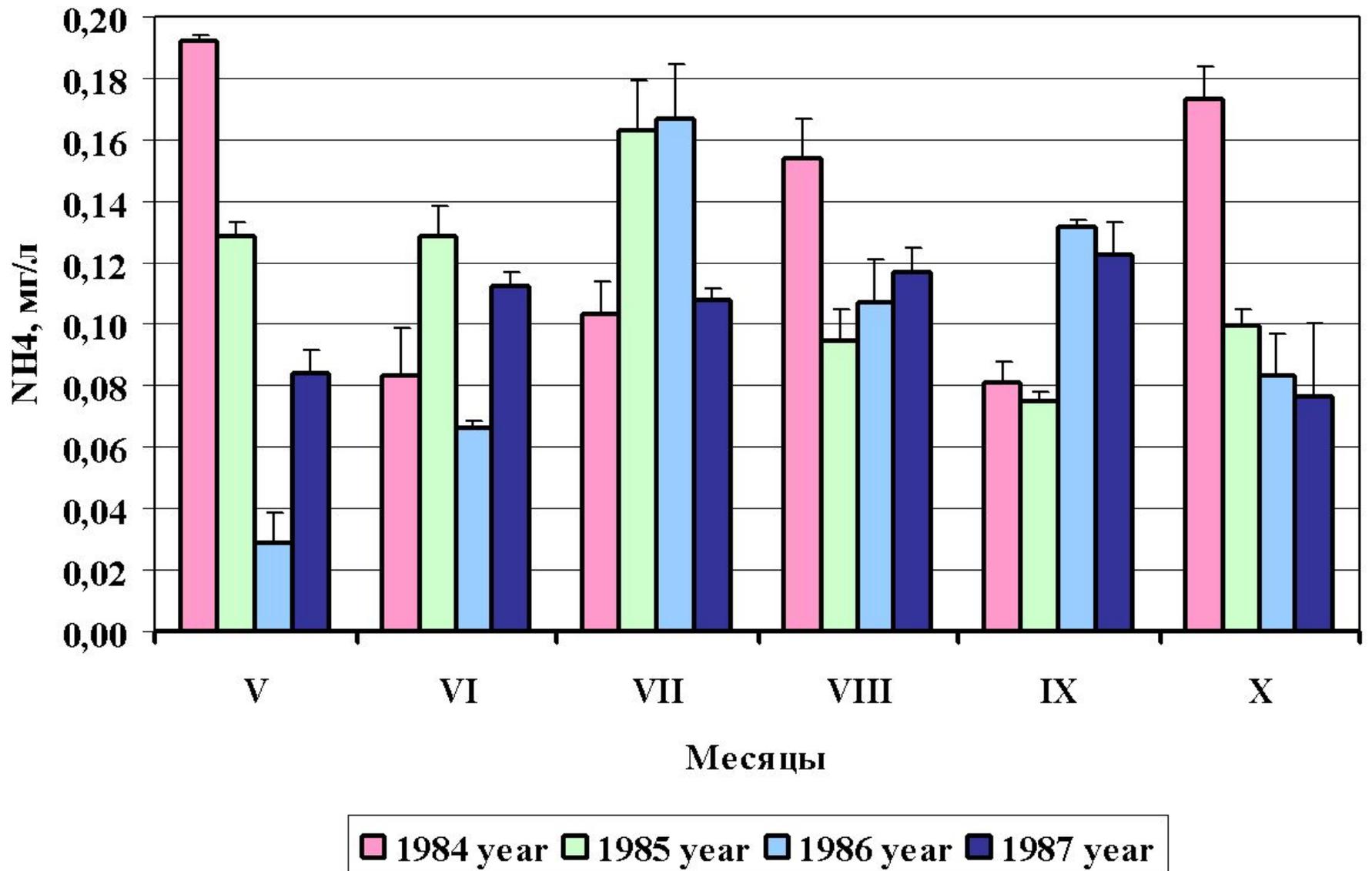


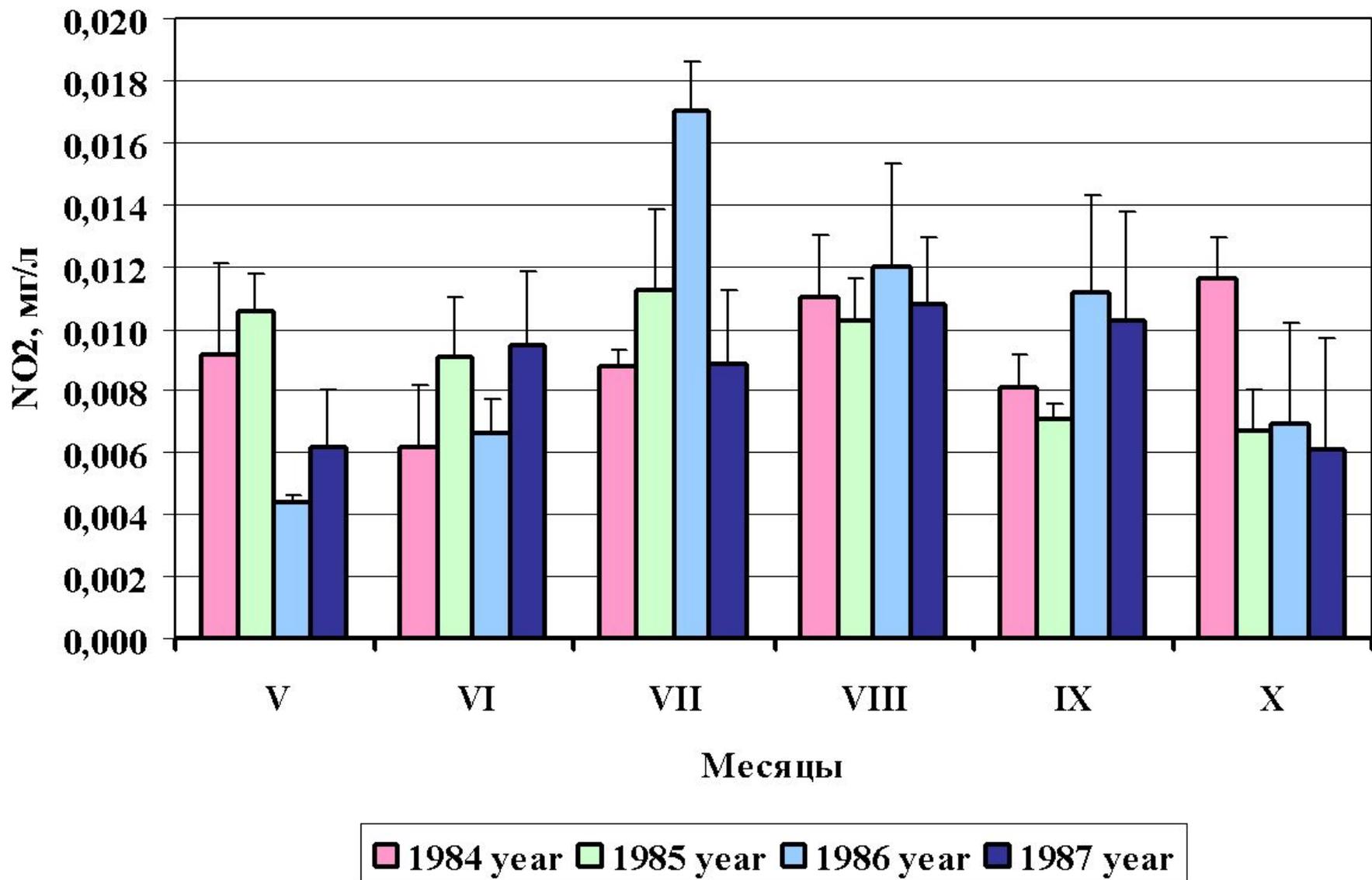
■ 1984 year
 ■ 1985 year
 ■ 1986 year
 ■ 1987 year

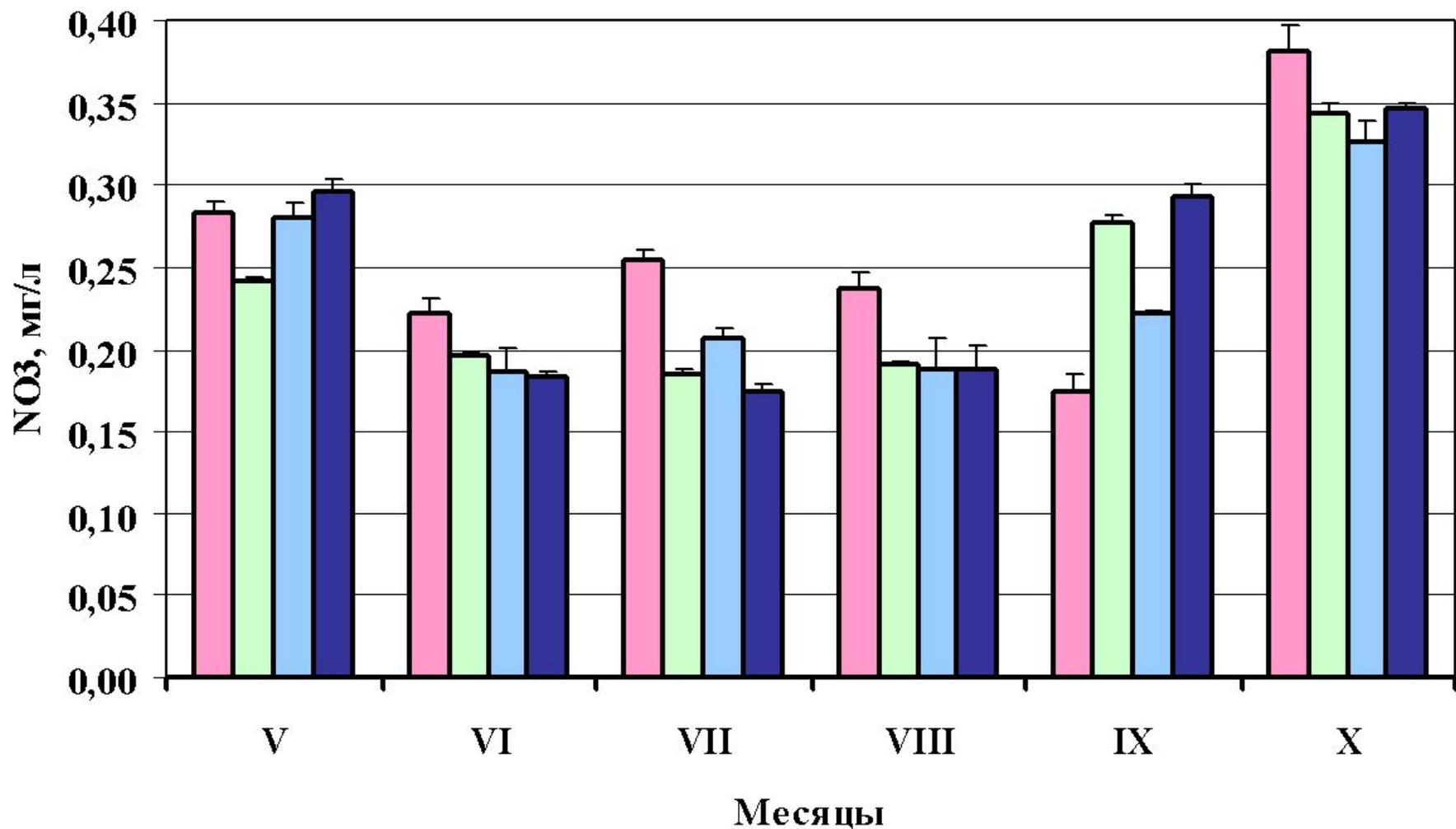




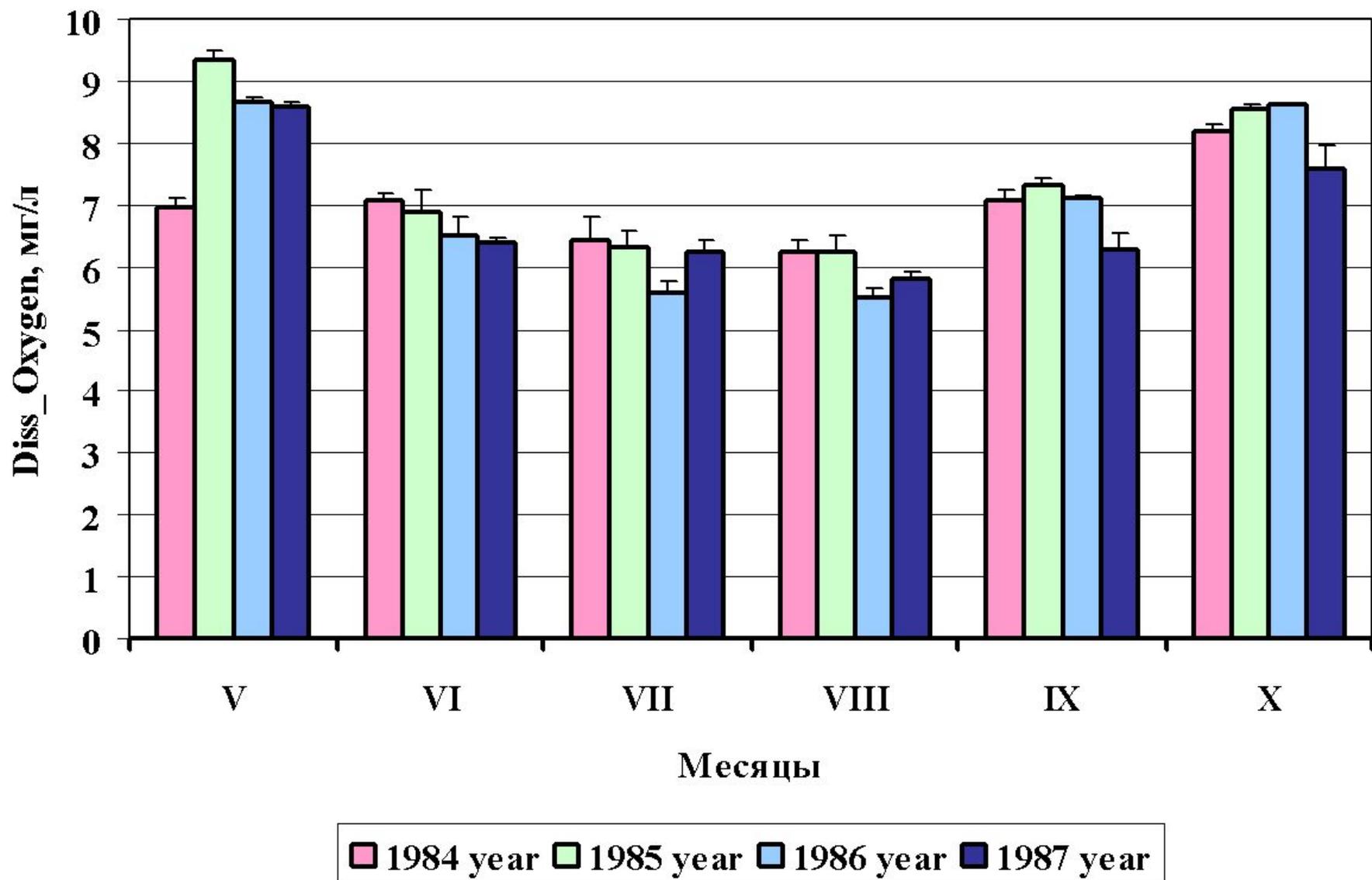
■ 1984 year ■ 1985 year ■ 1986 year ■ 1987 year

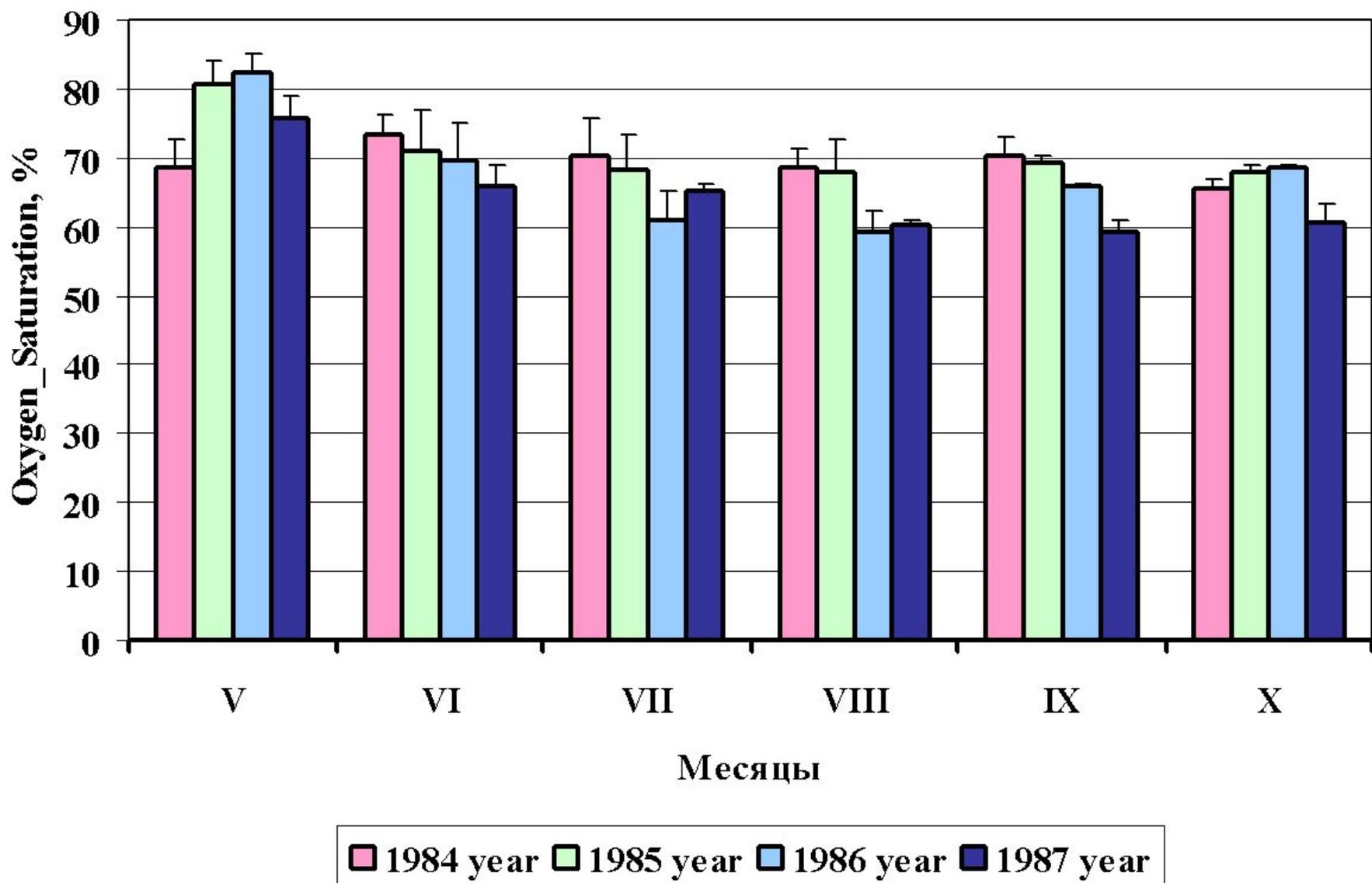






■ 1984 year ■ 1985 year ■ 1986 year ■ 1987 year





ВЫВОДЫ

- **Разработана экологически полноценная пространственно-неоднородная имитационная математическая модель водных экосистем нестратифицированных водоемов, которая позволяет проводить всесторонние исследования процессов биотрансформации форм азота, фосфора и динамики растворенного в воде кислорода. Модель учитывает основные взаимодействия как природных, так и антропогенных факторов, их совместное влияние на водную экосистему. Осуществлена практическая реализация данной модели для условий НГ Финского залива Балтийского моря**

ВЫВОДЫ

- **Применение математической модели позволило провести детальный анализ распределения концентраций биогенных веществ по акватории НГ и выявить основные качественные и количественные особенности формирования их пространственно-временной изменчивости. Впервые такое исследование было проведено системно для всего вегетационного периода и сразу для нескольких лет, по которым имеются подробные систематические наблюдения (период 1984–1987 гг.)**

ВЫВОДЫ

- **Расчеты по модели показали, что экосистема НГ Финского залива – чрезвычайно изменчивая во времени и по пространству динамическая система. Выявлено, что значения средних концентраций биогенных веществ для одного и того же периода времени в разные годы могут отличаться в несколько раз. Формирование неоднородного распределения концентраций компонентов экосистемы НГ происходит под влиянием совместного действия ряда биотических и абиотических факторов, значимость которых существенно изменяется по пространству и во времени**

ВЫВОДЫ

- **Показано, что содержание соединений N и P в воде НГ не может ограничивать увеличение биопродуктивности этой акватории. Однако вклад первичной продукции фитопланктона в общее поступление органического вещества невелик, что, скорее всего, связано с достаточно низкой прозрачностью воды в НГ. Роль зоопланктона в экосистеме НГ невелика. Результаты моделирования и данные наблюдений показывают, что основная причина интенсивного развития гетеротрофных микроорганизмов в водах НГ – значительное поступление аллохтонного органического вещества из внешних источников**

ВЫВОДЫ

- **Данные моделирования позволили дать предварительную оценку о возможном влиянии строящегося КЗС г. Санкт-Петербурга от наводнений на пространственно-временную динамику полей химических и биологических компонентов экосистемы НГ. Показано, что при открытии всех водопропускных и судопропускных отверстий, влияние КЗС в целом невелико. Оно во многом зависит от текущих гидрометеорологических условий и гидрологической ситуации в губе и если проявляется, то прослеживается на расстоянии не более 2-5 км от КЗС**

Спасибо за внимание