

УДК 556.551

*Арно ПИХЛАК, Элло МАРЕМЯЭ, Айни ЛИНДПЕРЕ, Ану МИЛИУС,
Хенно СТАРАСТ*

ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОД ПСКОВСКО- ЧУДСКОГО ОЗЕРА В ИЮНЕ 1985 г.

Усиление антропогенного воздействия и предполагаемое использование Псковско-Чудского озера не только в качестве рыбохозяйственной и рекреационной зон, но и в качестве крупного резерва пресной воды для промышленности и коммунального хозяйства республики заставляет обращать пристальное внимание на экологическое состояние этого водоема и изучать закономерности его изменения. Так, на основании результатов исследований последних десятилетий можно утверждать, что именно антропогенное влияние привело к изменениям ионного состава, газового режима вод и экосистемы Псковско-Чудского озера (Симм, 1975; Псковско-Чудское озеро, 1983; Мязметс и др., 1985; Линдпере и др., 1986).

Несмотря на длительное изучение, наши знания о Псковско-Чудском озере еще недостаточны для разработки эффективных мер по его охране в настоящее и прогнозируемое будущее время. Причиной этого «является разобщенность гидрологических, гидрохимических и в особенности гидробиологических исследований» (Капутерко и др., 1985), т. е. — их некомплектность, что затрудняет увязку и интерпретацию данных, полученных разными исследователями. Порой объемы проводимых наблюдений и анализов недостаточны для представительной характеристики состояния такого крупного водоема, как Псковско-Чудское озеро. Так, например, гидрохимическая характеристика озера за 20-летний период (1955—1975 гг.) в монографии «Чудско-Псковское озеро» (1983 г.) приводится, казалось бы, по большому числу определений ионов, в действительности же, в среднем в год на Чудское озеро приходится по 12—23, на Теплое — 1 и Псковское 2—4 определения каждого ингредиента. О гидрохимическом состоянии озера иногда судят даже только по данным анализов нескольких проб из одной точки в средней части озера (Симм, 1975). Отсутствуют в настоящее время также доступные, систематизированные, достаточно достоверные качественные и количественные данные об источниках загрязнения поверхностных вод и атмосферы в бассейне Псковско-Чудского озера, занимающей площадь 47 800 км², которая поделена между Псковской областью РСФСР (58,4%), Эстонской ССР (34,1%) и Латвийской ССР (7,5%). Эта раздробленность также затрудняет интерпретацию динамики изменения гидрохимических характеристик озера.

Новой программой исследований Псковско-Чудского озера намечены пути преодоления недостатков и повышения комплексности исследований. Сотрудничество в рамках этой программы между гидрохимической лабораторией Института зоологии и ботаники АН ЭССР и группой охраны окружающей среды Института химической и биологической физики АН ЭССР позволяет, как мы полагаем, более комплексно изучить гидрохимию Псковско-Чудского озера. Свою непосредственную задачу мы видим в комплексном изучении зависимостей между химическим соста-

вом воды, температурой, насыщенностью кислородом и другими гидрохимическими показателями с одной стороны, и степенью эвтрофированности озера, с другой. Особое внимание уделяется изменению содержания иона SO_4^{2-} в воде. Эти работы только разворачиваются. В ходе совместных предварительных экспериментов и наблюдений отработывается и уточняется методика. В настоящей статье отражены только первые предварительные результаты, могущие представлять некоторый интерес.

Методы исследования

При исследовании Псковско-Чудского озера 10—11 июня 1985 г. непосредственно с борта судна измеряли температуру воды и содержание в ней растворенного кислорода на глубине 2 м, рН и прозрачность воды (методом стандартного белого диска). В каждой из 27 точек наблюдений (рис. 1) отбирали пробы для гидрохимических анализов из поверхностного слоя воды (глубина ~20 см) и батометром для определения цветности, содержания питательных элементов (P, N), бихроматной окисляемости и хлорофилла *a* (глубина 50 см). Гидрохимический анализ воды на содержание Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , растворенного CO_2 , SiO_2 , жесткости, перманганатной окисляемости и сухого остатка при выпаривании выполняли по общепринятой методике (Саава, 1981) в гидрохимической лаборатории Управления геологии ЭССР, прошедшей интеркалибровку. Определение в воде содержания хлорофилла *a*, P и N и бихроматной окисляемости выполняли в ИЗБ АН ЭССР. Полученные данные замеров и анализов обрабатывали методами математической статистики в ИЗБ АН ЭССР и ИХБФ АН ЭССР (Линдпере и др., 1986) на ЭВМ типа «Apple». По

специальной топографической программе в ИХБФ АН ЭССР были составлены для Чудского озера карты изотерм воды, изолинии прозрачности, рН, Eh и содержания различных ингредиентов. Из-за малочисленности точек наблюдения в Теплом и Псковском озерах карты изолиний для этих озера не были построены. Авторы выражают благодарность А. Сирку за помощь, оказанную в приспособлении программы построения изолиний для задач настоящего исследования.

Для интерпретации данных привлекали также сведения о метеорологической обстановке во время отбора проб.

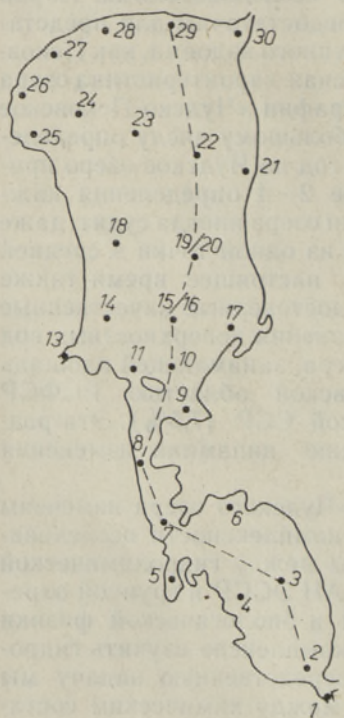


Рис. 1. Схема расположения точек наблюдений на акватории Псковско-Чудского озера и линии гидрохимического профиля 29-2.

Некоторые характеристики Псковско-Чудского озера

Псковско-Чудское озеро — наиболее крупный водоем в Эстонской ССР, относится также к числу крупнейших озер СССР. Оно состоит из соединенных между собой проливами Чудского, Теплого и Псковского озер (табл. 1).

Таблица 1

Основные геометрические параметры Псковско-Чудского озера

Наименование озера	Площадь зеркала воды, S		Объем воды в озере, V		$\frac{S}{V}$	Средняя глубина озера, м
	км ²	% от общего	км ³	% от общего		
Чудское	2613	76	21,79	87	119,9	8,3
Теплое	236	7	0,60	2	393,3	2,5
Псковское	709	20	2,86	11	264,6	3,8
Всего	3588	100	25,07	100	143,1	7,1

В озеро впадает более 30 рек и ручьев. Из них наиболее крупными являются реки Великая и Эмайыги (норма стока 124 и 57,2 м³/с соответственно). Из озера вытекает только р. Нарва (норма стока 331 м³/с). По средним многолетним данным в июне общий суммарный приток воды в озеро равен 728 млн. м³, а сток — 1556 млн. м³, т. е. превышает приток в 2,14 раза (Чудско-Псковское озеро, 1983). Следует отметить, что в просмотренной нами литературе мы не нашли водных балансов для каждого из озер Чудского, Теплого и Псковского в отдельности, весьма нужных для интерпретации результатов гидрохимических анализов.

Среднемесячная температура воздуха в июне на побережье озера повышается с севера на юг, составляя в Васкнарве 14,1, Гдове 14,9, Вярска 15,1 и Пскове 15,2 °С. В этом же направлении увеличивается и месячное количество осадков — в Васкнарве 63, Гдове 71 и Пскове 73 мм, а скорость ветра — соответственно 4,6, 4,2 и 3,6 м/с. Преобладают ветры юго-западного (18,5%), западного (17,5%) северо-западного (14%) и северного (12,5%) направлений, что определяет характер течений и движения водных масс в озере (Чудско-Псковское озеро, 1983; Филатова, 1985).

Среднесуточная температура воздуха 10 и 11 июня составляла соответственно 10,7 и 11,9 °С. Накануне выпало 8 мм осадков. Если допустить, что они равномерно распределились по зеркалу озера, то их объем 20,9 млн. м³ или около 0,1% от объема озера. Скорость ветра во время наблюдений колебалась от 1 до 3 м/с. Его направление изменялось от юго-западного до северо-восточного, а затем до юго-восточного.

Результаты гидрохимических исследований

В табл. 2 представлены средние содержания, пределы изменения и среднеквадратичные отклонения содержания компонентов в воде отдельно для Чудского, Теплого и Псковского озер. Из приведенных данных видно, что все три части Псковско-Чудского озера отличаются друг от друга степенью минерализации и составом воды. Особенно значительна разница между Чудским озером с одной стороны, и Теплым и Псков-

ским озерами, с другой. Наглядно это демонстрируется изменением ряда гидрохимических показателей вдоль линии 29-2, пересекающей все три озера от устья р. Алайыги на севере до устья р. Великая на юге (рис. 1 и 2).

Наиболее минерализованными оказались воды Чудского, и наименее минерализованными — Теплового озера (табл. 2). Распределение по акватории Чудского озера общей минерализации воды, а также компонентов, определяющих ионный состав и свойства воды, показано на рис. 3—26.

Минерализация воды распределяется довольно равномерно по площади озера. Ее максимумы находятся в устьях рек Эмайыги и Авийыги, а минимумы — в районе Раскопель—Мехикоорма—Пийрисаар, Омеду и Муствеэ (рис. 3). Наиболее высокие содержания в воде Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- и HCO_3^- расположены широкой полосой от устья р. Эмайыги в северо-

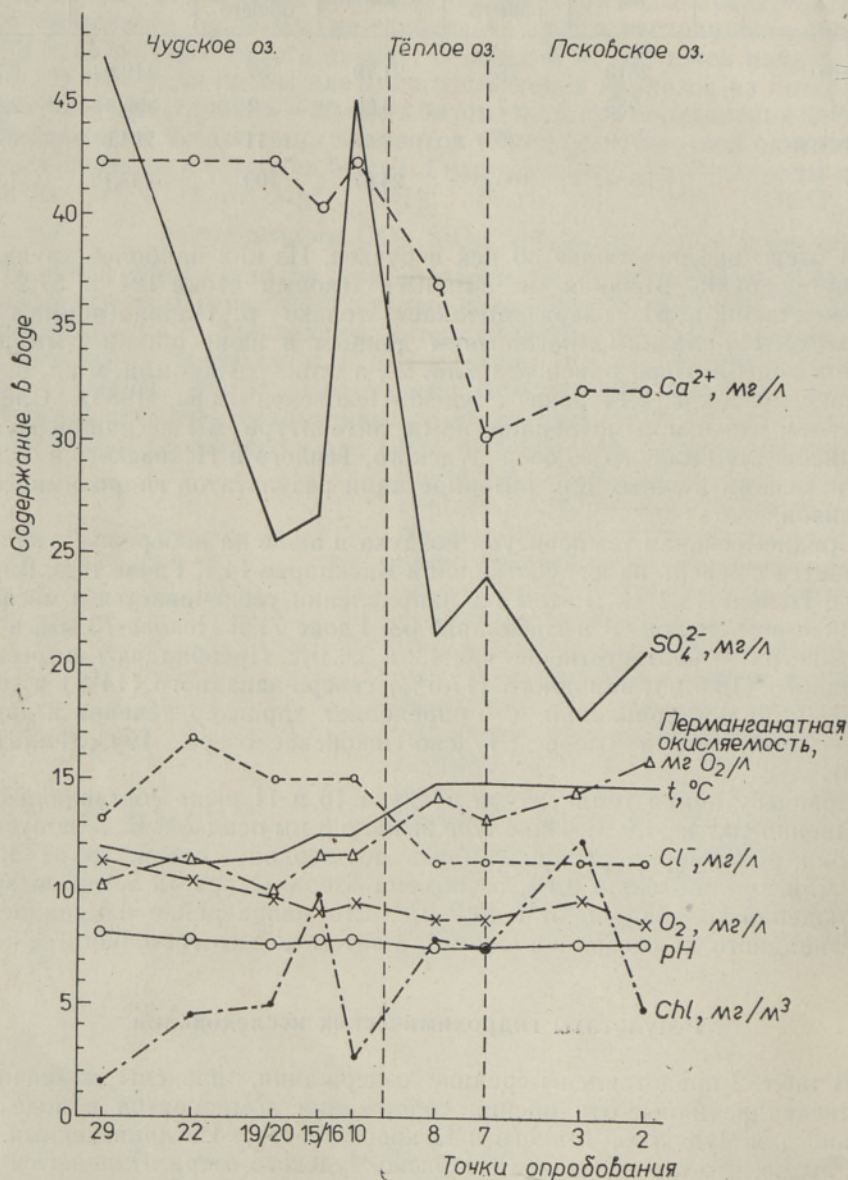


Рис. 2. Гидрохимический профиль по линии 29-2 через Чудское, Теплое и Псковское озера.

Состав воды Псковско-Чудского озера по данным опробования 10—11/VI 1985 г.

Показатель	Псковское оз.				Теплое оз.				Чудское оз.				р. Великая (устье)	р. Эмайги (устье)
	Число точек определения	мин.-макс. средн.	±σ	Коэффициент вариации, %	Число точек определения	мин.-макс. средн.	±σ	Коэффициент вариации, %	Число точек определения	мин.-макс. средн.	±σ	Коэффициент вариации, %		
Температура воды, °С**	5	14,6—15,1 14,8±0,16	0,18	1,2	3	14,8—14,9 14,8±0,06	0,05	0,32	17	11,1—14,4 12,5±0,45	0,92	7,4	15,6	14,0
Прозрач- ность*, м	5	1,1—2,0 1,48±0,81	0,91	61,2	2	0,9—1,9 1,4	—	—	17	1,8—4,5 2,91±0,36	0,75	25,7	1,2	0,9
Цветность*, град.	5	45—60 53,0±5,4	6,0	11,3	3	45—80 58,3±17,9	15,5	26,5	17	25—55 35,0±3,5	7,3	20,9	60,0	65,0
Растворен- ный O ₂ , мг/л**	5	8,7—10,4 9,48±0,52	0,58	6,1	3	8,15—8,80 8,58±0,36	0,31	3,6	17	9,0—11,4 9,74±0,32	0,66	6,7	8,8	6,3
Насыщение воды O ₂ , %**	5	88,3—106,3 96,6±5,4	6,05	6,3	3	83,3—89,7 87,6±3,5	3,02	3,4	17	89,0—109,3 94,3±2,6	5,37	5,7	91,3	63,1
pH воды	5	7,66—7,96 7,75±0,10	0,11	1,4	3	7,53—7,62 7,57±0,05	0,04	0,49	17	7,76—8,28 8,02±0,08	0,16	1,9	7,76	7,42
Eh, мВ	5	+509÷537 524,4±8,7	9,73	1,9	3	+528÷536 532,7±3,9	3,40	0,64	17	+478÷522 499,2±5,5	11,32	2,3	+522	+526
Сухой оста- ток, мг/л	5	157,0—175,0 164,4±5,6	6,22	3,8	3	149,5—160,0 156,5±5,7	4,95	3,2	17	173,5—234,5 199,1±7,8	16,1	8,1	224,5	271,5
Сумма глав- ных ионов, мг/л	5	180,4—236,9 203,6±19,0	21,21	10,4	3	170,9—203,8 191,2±20,5	17,75	9,3	17	221,7—280,2 253,2±8,4	17,4	6,8	280,2	351,3
Na ⁺ , мг/л	5	4,0—5,3 4,8±0,4	0,48	10,0	3	2,5—5,0 4,1±1,3	1,12	27,2	17	4,7—6,0 5,4±0,2	0,42	7,8	8,0	6,0
K ⁺ , мг/л	5	3—3 3	0	0	3	0,5—3,0 1,7±1,2	1,03	60,5	17	1,5—2,5 2,4±0,16	0,32	13,4	3,0	2,5
Ca ²⁺ , мг/л	5	32,1—36,3 32,9±1,5	1,68	5,1	3	30,1—36,3 32,2±3,4	2,92	9,1	17	38,3—44,3 40,5±1,0	2,04	5,0	46,3	60,3
Mg ²⁺ , мг/л	5	6,1—8,5 7,1±0,8	0,90	12,7	3	4,9—6,1 5,3±0,7	0,57	10,7	17	7,3—12,2 9,7±0,6	1,19	12,3	10,3	14,6
Cl ⁻ , мг/л	5	11,3—26,2 15,8±5,3	5,96	37,8	3	11,3—11,3 11,3	0	0	17	5,7—16,7 13,2±1,4	2,86	21,6	11,3	18,8
SO ₄ ²⁻ , мг/л	5	17,7—32,4 23,4±4,5	5,04	21,5	3	12,8—23,9 19,4±5,5	4,75	24,5	17	20,6—49,8 34,9±4,2	8,61	24,7	24,3	41,6
HCO ₃ ⁻ , мг/л	5	109,8—140,3 120,8±10,0	11,18	9,3	3	109,8—122,0 117,9±6,6	5,75	4,9	17	128,1—158,7 147,2±5,0	10,34	7,0	177,0	207,5
Перманганат- ная окисляе- мость, мгO ₂ /л	5	12,0—17,0 14,4±1,7	1,88	13,1	3	13,2—20,2 15,9±3,6	3,09	19,4	17	7,4—13,6 10,5±0,7	1,48	14,1	18,9	18,0
Бихроматная окисляемость, мгO ₂ /л	5	16,5—43,1 31,2±11,0	12,3	39,5	3	29,1—61,7 40,1±21,6	18,7	46,6	16	16,5—39,9 25,5±3,9	8,1	31,8	33,9	53,9
Индекс Скопинцева, %	5	35,1—72,7 51,4±17,8	19,9	38,7	3	32,7—48,0 42,0±9,4	8,2	19,5	16	26,2—69,1 44,9±6,7	13,5	30,1	55,7	33,4
Фосфор*, мг/м ³	5	26—82 50,8±19,6	21,93	43,2	3	47—53 50,7±2,7	2,62	5,2	17	16—46 22,8±3,2	6,68	29,3	91	85
Азот*, мг/м ³	5	515—1256 877±226	285,9	32,6	3	785—1097 895±165	143,0	16,0	17	222—1241 579±130	267,7	46,3	998	1121
Хлорофилл a*, мг/м ³	5	3,4—21,9 9,2±6,4	7,17	78,0	3	3,0—8,0 6,2±2,6	2,25	36,3	17	0,6—9,8 4,1±1,3	2,76	67,9	8,0	2,3
SiO ₂ , мг/л	5	2,5—5,0 3,0±0,9	1,0	33,3	3	2,4—3,3 2,8±0,4	0,37	13,0	17	0,1—4,3 1,9±0,7	1,51	80,3	1,9	4,4
Общая жест- кость, мг-экв./л	5	2,10—2,51 2,22±0,14	0,16	7,2	3	1,90—2,21 2,04±0,29	0,25	12,2	17	2,41—3,11 2,83±0,16	0,17	5,9	3,16	4,21
Содержание ОВ по пер- манганатной окисляе- мости, мг/л	5	24,0—34,0 28,8±3,4	3,77	13,1	3	26,4—40,4 31,8±7,2	6,18	19,4	17	14,8—27,2 21,0±1,4	2,96	14,1	37,8	36,0
по бихро- матной окисляе- мости, мг/л	5	12,4—31,0 23,4±8,2	9,23	39,5	3	22,2—46,3 30,1±16,2	14,03	46,6	16	12,4—29,9 19,2±3,0	6,21	32,4	25,4	40,4

Примечание.* Данные Института зоологии и ботаники АН ЭССР. ** На глубине 2 м.

восточном направлении к г. Гдову и к Васьнарве, максимальные содержания SO_4^{2-} — отдельными пятнами от устья р. Эмайгы по направлению к р. Желча, а также в северо-восточном «углу» озера. Содержание NO_3^- наиболее высокое в устье р. Эмайгы. Локальные максимумы обнаружены около г. Гдова и в районе вертикали 19/20. Наиболее высокие содержания Р и N встречались на юге озера, а наиболее низкие — в его северо-западном углу. Аналогично изменялась также перманганатная окисляемость воды. Цветность воды уменьшалась, а ее прозрачность увеличивалась с юга на север и северо-восток. рН воды увеличивался в направлении юго-восток — северо-запад. Содержание хлорофилла *a* в

Рис. 3—26. Гидрохимическое состояние Чудского озера 10—11 июня 1985 г.

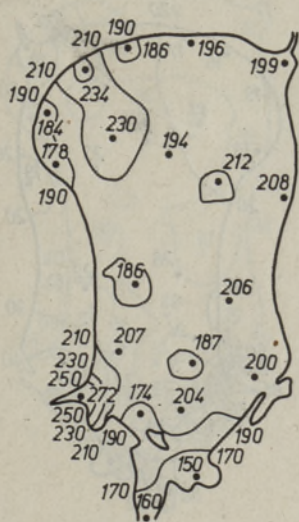


Рис. 3. Минерализация воды (сухой остаток), мг/л.

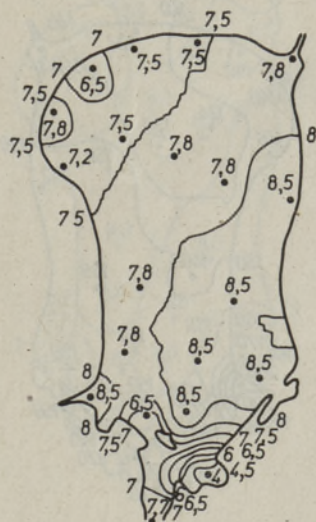


Рис. 4. Содержание в воде $Na^+ + K^+$, мг/л.

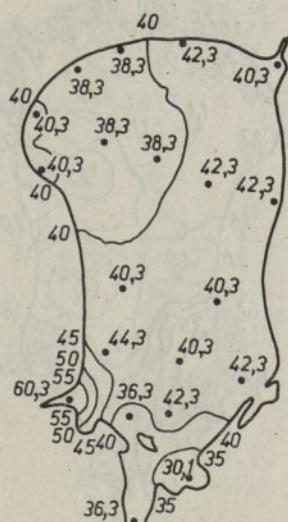


Рис. 5. Содержание в воде Ca^{2+} , мг/л.

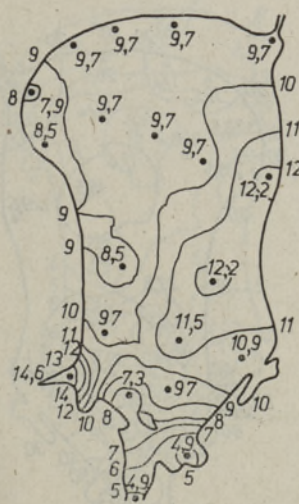


Рис. 6. Содержание в воде Mg^{2+} , мг/л.

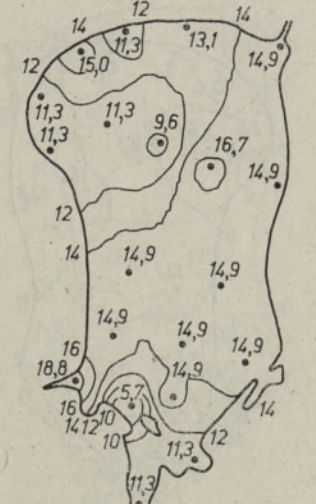


Рис. 7. Содержание в воде Cl^- , мг/л.

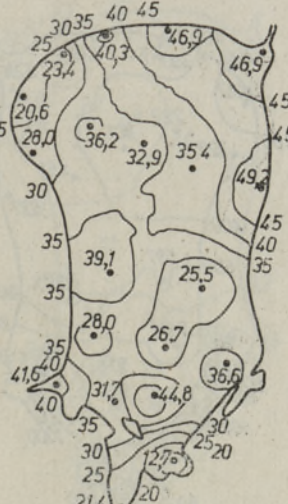


Рис. 8. Содержание в воде SO_4^{2-} , мг/л.

воде наиболее высокое на юге озера в районе о. Пийрисаар, устья р. Раскопель и вертикали 15/16, уменьшаясь в северо-западном направлении и достигая минимума в районе рек Омеду и Раннапунгерья. Локальный максимум содержания хлорофилла *a* был отмечен у вертикали 23. Примерно также менялась и сумма питательных веществ (К, N, P), а также содержание органики в воде Чудского озера. Их наиболее высокое содержание обнаружено у устья рек Эмайыги и Раскопель. Уменьшаясь в северо-западном направлении, они достигли минимума около берега между устьями рек Омеду и Раннапунгерья. Содержание SiO_2 наиболее высокое на юге и юго-востоке озера и наиболее низкое — около его северо-западного и западного побережья. Жесткость воды распределяется в воде примерно также, как содержание Ca^{2+} , Mg^{2+} , и HCO_3^- .

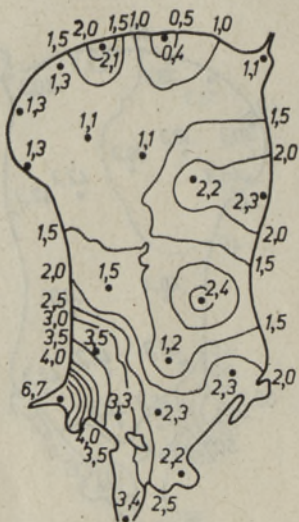


Рис. 9. Содержание в воде NO_3^- , мг/л.

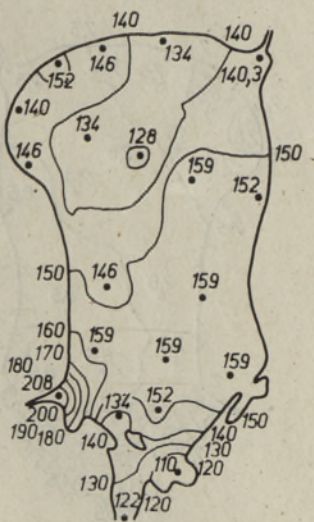


Рис. 10. Содержание в воде HCO_3^- , мг/л.

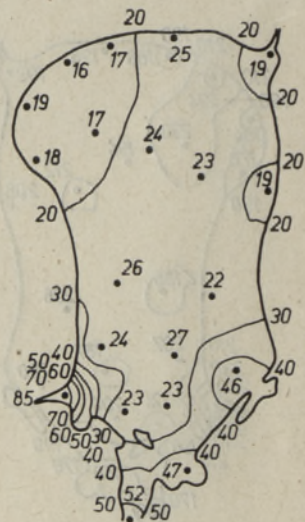


Рис. 11. Содержание в воде P, мг/м³.

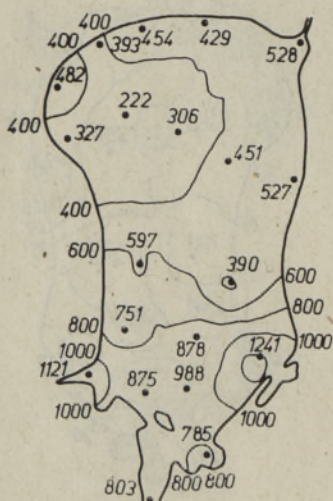


Рис. 12. Содержание в воде N, мг/м³.

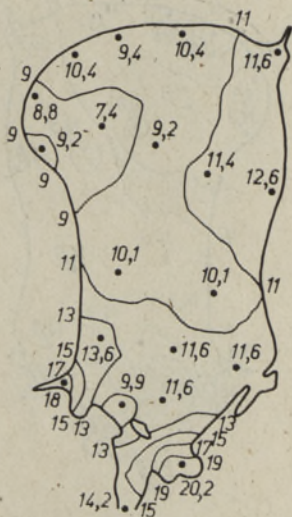


Рис. 13. Перманганатная окисляемость воды, мг/л.

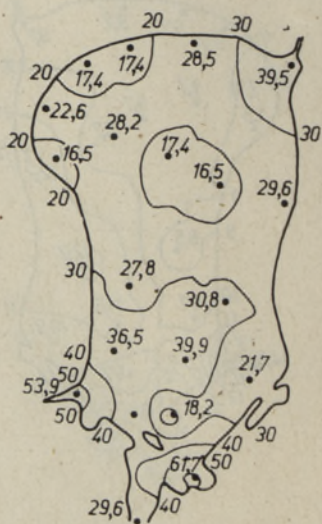


Рис. 14. Бихроматная окисляемость воды С, мг O_2 /л.

Содержание в воде растворенного кислорода наиболее высокое в средней части северной половины озера. Вода наиболее теплая на юге и северо-западе и наиболее холодная — на востоке озера. Такое распределение гидрохимических и физических показателей воды по площади Чудского озера является результатом многих изменяющихся факторов, к которым относятся поступление минеральных веществ с речным стоком и атмосферными осадками, перераспределение их течениями и волнением, испарение и взаимодействие растворенных веществ с живым веществом и др. Связь между изменением во времени гидрохимических показателей воды и гидрологическими и метеорологическими условиями изучена слабо и требует дальнейшего, более детального изучения.

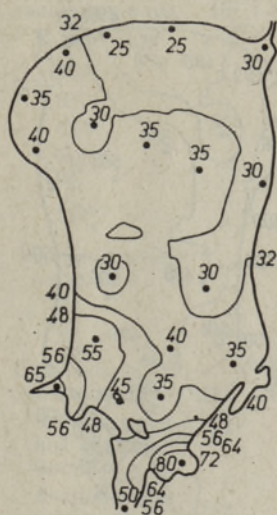


Рис. 15. Цветность воды, град.

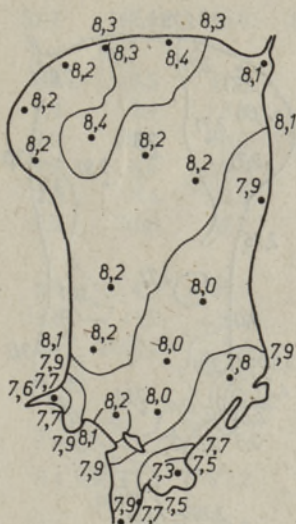


Рис. 16. pH воды.

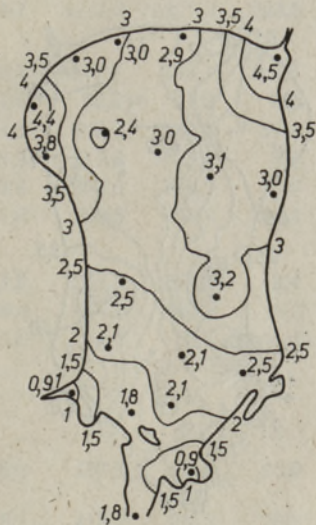


Рис. 17. Прозрачность воды, м.

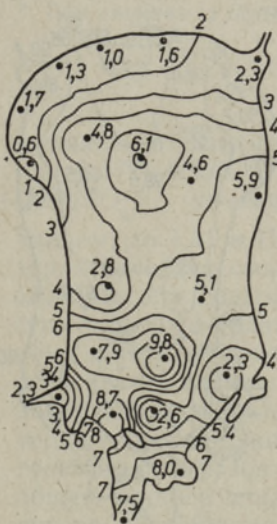


Рис. 18. Содержание в воде Chl a, мг/м³.

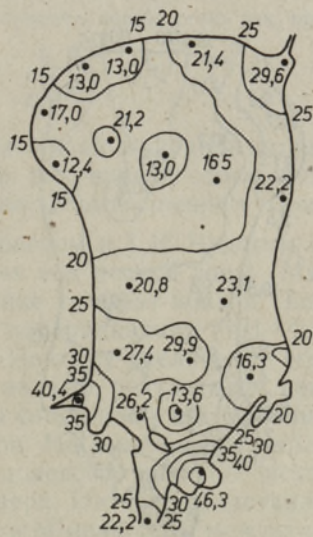


Рис. 19. Содержание в воде органического вещества, мг/л.

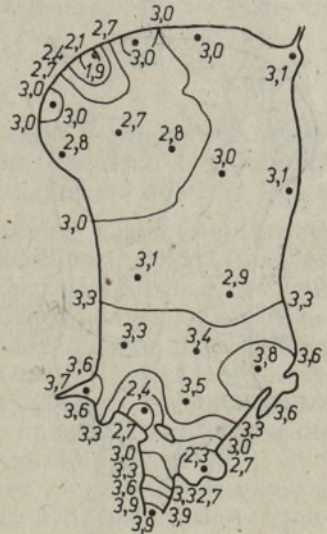


Рис. 20. Содержание в воде K+N+P, мг/л.

По ориентировочной оценке в Псковско-Чудском озере и впадающих в него реках наиболее распространенным минеральным элементом является Ca — 990, следует Cl — 336,7, S — 278,3 и Mg — 233,6 тыс. т (табл. 3). В воде озера содержится 499,2—553,9 тыс. т органики, что составляет около 9% от суммы растворенных в воде минеральных веществ. Интересно отметить, что из всех элементов только поступление фосфора в озеро с речными водами значительно превышает его сток по р. Нарве.

Основными ионами в составе вод Псковско-Чудского озера являются HCO_3^- , Ca^{2+} и SO_4^{2-} (табл. 2). Соотношение средних содержаний $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ в воде Чудского, Теплого и Псковского озер практически не

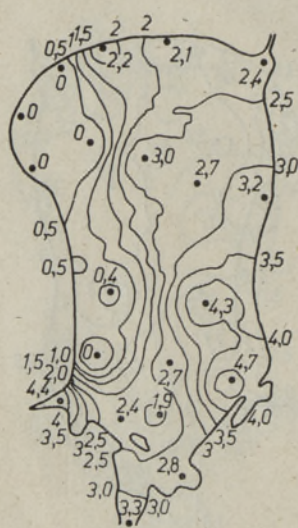


Рис. 21. Содержание в воде SiO_2 , мг/л.

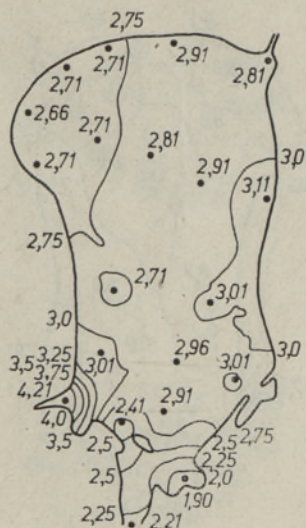


Рис. 22. Общая жесткость воды, мг-экв./л.

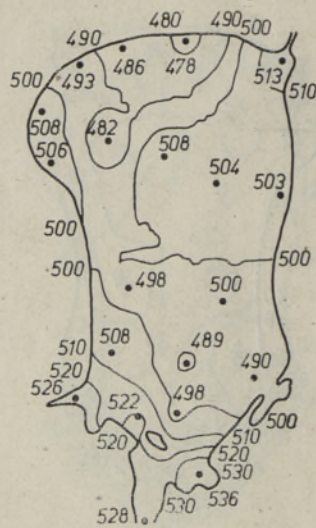


Рис. 23. Ен воды, мВ.



Рис. 24. Температура воды (на глубине 2 м), °С.

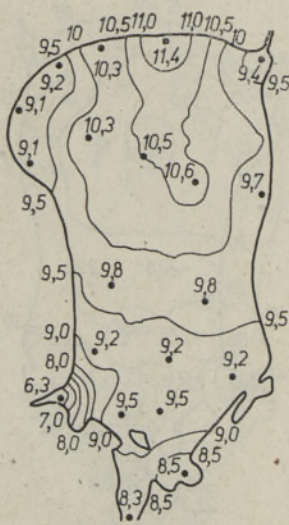


Рис. 25. Содержание в воде растворенного O_2 (на глубине 2 м), мг/л.

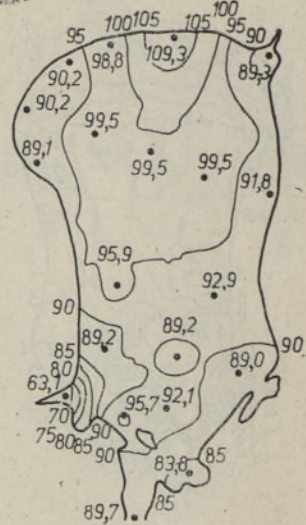


Рис. 26. Насыщение воды O_2 (на глубине 2 м), %.

Ориентировочная оценка количества растворенных в воде Псковско-Чудского озера минеральных веществ, содержания органики и хлорофилла *a*, их поступления в озеро с водой основных рек и стокам по р. Нарве в июне 1985 г.

Компоненты	Единица измерения	Поступление по основным рекам			Содержалось в воде озер				Сток по р. Нарве*
		Великая*	Эмайги*	Всего	Псковского	Теплого	Чудского	Всего	
Всего растворено в воде минеральных в-в	10 ³ т	89,7	52,7	142,4	545,6	114,7	5517,2	6177,5	223,5
В том числе:									
Na ⁺	„	2,6	0,9	3,5	12,9	2,5	117,7	133,1	4,6
K ⁺	„	1,0	0,4	1,4	8,0	1,0	52,3	61,3	2,2
Ca ²⁺	„	14,8	9,0	23,8	88,2	19,3	882,5	990,0	34,7
Mg ²⁺	„	3,3	2,2	5,5	19,0	3,2	211,4	233,6	8,3
Cl ⁻	„	3,6	2,8	6,4	42,3	6,8	287,6	336,7	12,8
SO ₄ ²⁻	„	7,8	6,2	14,0	62,7	11,6	760,5	834,8	40,3
то же в пересчете на S	„	2,6	2,1	4,7	20,9	3,9	253,5	278,3	13,4
P	т	29,1	12,8	41,9	136,1	30,4	496,8	663,3	16,3
N	10 ³ т	0,1	0,17	0,28	2,4	0,5	12,6	15,5	0,45
Содержание ОВ, рассчитанное по перманганатной окисляемости	„	12,1	5,4	17,5	77,2	19,1	457,6	553,9	20,0
бихроматной окисляемости	„	8,1	6,1	14,2	62,7	18,1	418,4	499,2	25,5
Содержание хлорофилла	т	2,6	0,3	2,9	24,7	3,7	89,3	117,7	2,0

* При расчетах за основу приняты нормы стока рек, приведенные в «Чудско-Псковское озеро» (1983 г.).

менялось от изменения общей минерализации воды, оставаясь в пределах 0,272—0,275. В то же время соотношение средних содержаний Ca²⁺/SO₄²⁻ уменьшалось с повышением минерализации воды от 1,66 в Теплом, до 1,41 в Псковском и 1,16 Чудском озерах. Такое уменьшение характерно для озерных вод лесной зоны (Максимович, 1955). Следует отметить, что содержание сульфат-иона в Псковско-Чудском озере при существующем уровне минерализации (191—235 мг/л) близко к нормальному в этих условиях. Поэтому увеличение его содержания в последние десятилетия является, видимо, результатом повышения общей минерализации вод, а не только следствием поступления сульфатов из отдельных техногенных источников. Несомненный интерес представляет выяснение генезиса сульфатов и долевого участия источников их поступления в общем балансе серы озера. Интерес представляет также изучение круговорота, распределения и обмена серы между водой (сульфатность), донными осадками (сульфиды) и содержащимся в воде органическим веществом. Предварительные исследования, проведенные в июне 1985 г. показали, что, например, между сульфатностью воды и концентрацией хлорофилла *a* существует достаточно тесная ($r = -0,761$ и $-0,65$) обрат-

Коэффициенты парной корреляции (натурально-логарифмические) между различными

	Остаток при выпаривании	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Σ катио- нов	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Σ анио- нов
Na ⁺	0,591	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K ⁺	0,058	0,082	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca ²⁺	0,790	0,646	0,254	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg ²⁺	0,840	0,730	0,149	0,797	—	—	—	—	—	—	—
Σ катионов	0,734	0,727	0,307	0,850	0,862	—	—	—	—	—	—
Cl ⁻	0,183	0,304	0,267	0,189	0,228	0,330	—	—	—	—	—
SO ₄ ²⁻	0,588	0,577	0,087	0,666	0,635	0,588	0,058	—	—	—	—
NO ₃ ⁻	-0,440	-0,291	-0,161	-0,437	-0,489	-0,450	-0,282	-0,260	—	—	—
HCO ₃ ⁻	0,778	0,683	0,037	0,872	0,852	0,837	0,206	0,495	-0,311	—	—
Σ анионов	0,826	0,765	0,140	0,918	0,881	0,878	0,361	0,792	-0,424	0,865	—
Жесткость:											
общая	-0,016	-0,115	0,003	-0,083	-0,090	-0,070	-0,076	-0,051	-0,163	-0,130	-0,096
карбонатная	0,838	0,687	0,054	0,922	0,862	0,856	0,157	0,531	-0,368	0,961	0,887
некарбонатная	0,438	0,311	0,744	0,583	0,538	0,544	0,098	0,509	-0,441	0,355	0,506
SiO ₂	-0,406	-0,006	0,051	-0,291	-0,125	-0,112	0,062	0,084	0,200	-0,249	-0,167
Окисляемость											
перманганатная	-0,576	-0,493	0,005	-0,509	-0,495	-0,347	0,199	-0,513	0,567	-0,387	-0,491
бихроматная	-0,289	-0,349	0,060	-0,270	-0,186	-0,147	-0,114	-0,373	0,193	-0,173	-0,308
Хлорофилл <i>a</i>	-0,234	-0,089	0,157	-0,263	-0,161	-0,006	-0,019	-0,334	0,370	-0,185	-0,263
P	-0,633	-0,318	-0,033	-0,594	-0,516	-0,399	-0,028	0,554	0,571	-0,455	-0,590
N	-0,532	-0,147	-0,129	-0,378	-0,375	-0,375	-0,105	-0,260	0,728	-0,225	-0,357
Прозрачность	0,625	0,519	-0,033	0,671	0,609	0,474	0,073	0,603	-0,580	0,548	0,669
Цветность	-0,640	-0,624	-0,031	-0,645	-0,675	-0,522	-0,076	-0,780	0,599	-0,521	-0,727
pH	0,534	0,533	0,240	0,509	0,475	0,539	-0,026	0,467	-0,407	0,392	0,526
Растворенный O ₂	0,479	0,431	0,251	0,433	0,527	0,577	0,099	0,593	-0,464	0,292	0,537
Насыщенный O ₂	0,168	0,191	0,232	0,140	0,174	0,279	0,010	0,395	-0,276	-0,046	0,234
Температура воды	-0,747	-0,499	-0,068	-0,731	-0,793	-0,631	-0,085	-0,730	0,576	-0,636	-0,763

ная зависимость (рис. 27). Полученные опытные точки ($n=25$) разделились на два «облака» ($n_1=16$; $n_2=9$), для которых связь между содержанием хлорофилла *a* (X , мг/м³) и сульфат-иона (Y , мг/л) в воде соответственно выражена уравнениями

$$Y = \exp[(3,88 - 0,07X) \pm 0,10] \quad (1)$$

$$Y = \exp[(3,28 - 0,06X) \pm 0,15]. \quad (2)$$

Полученные результаты позволяют предположить, что присутствие сульфат-иона подавляет жизнедеятельность хлорофиллсодержащего планктона, и что существует по меньшей мере две его разновидности или группы разновидностей, обладающих различной устойчивостью к сульфат-иону. Дальнейшие исследования должны подтвердить или опровергнуть это предположение. В пользу существования такой зависимости говорят также высокие коэффициенты парной корреляции между содержанием в воде сульфат-иона и ее цветностью ($r=-0,780$) и прозрачностью ($r=0,603$). Несколько менее тесная связь наблюдается между содержанием сульфат-иона и перманганатной окисляемостью воды ($r=-0,513$). В объяснениях нуждаются прямая корреляционная зависимость между сульфатностью воды и содержанием растворенного кислорода ($r=0,593$) и обратные зависимости между сульфатностью, содер-

ингредиентами, содержащимися в воде Псковско-Чудского озера (10—11 июня 1985 г.)

Жесткость			SiO ₂	Окисляемость		Хлорофилл <i>a</i>	P	N	Прозрачность	Цветность	рН	Растворенный O ₂	Насыщенный O ₂
общая	карбонатная	некарбонатная		перманганатная	биоксигенная								
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—0,078	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—0,045	0,359	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—0,187	0,346	0,070	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—0,067	—0,479	—0,361	0,458	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,088	—0,205	0,202	0,212	0,607	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,106	—0,199	—0,027	0,401	0,546	0,630	—	—	—	—	—	—	—	—
—0,298	—0,513	—0,454	0,480	0,753	0,524	0,541	—	—	—	—	—	—	—
—0,357	—0,311	—0,380	0,452	0,637	0,359	0,330	0,689	—	—	—	—	—	—
0,037	0,586	0,378	—0,372	—0,775	—0,557	—0,683	—0,805	—0,578	—	—	—	—	—
0,000	—0,566	—0,447	0,070	0,784	0,462	0,536	0,647	0,509	—0,799	—	—	—	—
0,299	0,481	0,394	—0,407	—0,775	—0,386	—0,218	—0,480	—0,541	0,485	—0,580	—	—	—
0,166	0,371	0,493	0,131	—0,461	—0,287	0,024	—0,299	—0,513	0,324	—0,639	0,735	—	—
0,203	0,052	0,309	0,125	—0,330	—0,259	0,048	—0,135	—0,345	0,084	—0,403	0,683	0,889	—
0,008	—0,667	—0,574	—0,047	0,587	0,320	0,327	0,617	0,529	—0,736	0,845	—0,390	—0,628	—0,282

жанием фосфора ($r = -0,554$) и температурой воды ($r = -0,730$) (табл. 4). Последние, видимо, являются следствием связывания серы и фосфора с ОВ. Увеличение сульфатности при увеличении содержания растворенного кислорода — следствие окисления и перехода связанного с органикой серы вновь в сульфатную форму.

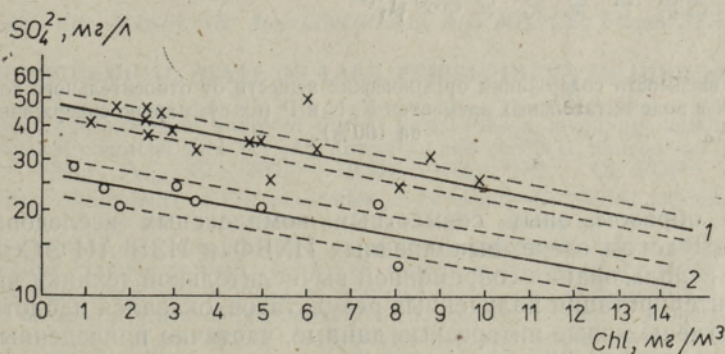


Рис. 27. Зависимости (1, 2) между содержанием хлорофилла *a* и сульфатнона в воде Псковско-Чудского озера.

Приведенные в табл. 4 коэффициенты парной корреляции между количеством содержащихся в воде озера компонентов, ОВ, физическими и химическими показателями состояния и качества воды и др. представляют большой интерес для объяснения протекающих в озере процессов, но этот вопрос требует отдельного рассмотрения на более обширном материале.

Весьма интересна зависимость содержания ОВ в воде от соотношений в ней растворенных основных питательных элементов К, Р и N (рис. 28). Их содержание было приравнено к 100%, что позволило изображать их содержание в пробе на треугольной диаграмме совокупно одной точкой, а соответствующее им содержание ОВ проектировать на вертикальную плоскость, параллельную одной из сторон треугольной диаграммы. Из рис. 28 видно, что и здесь мы имеем две совокупности точек, выражающих различное отношение живого вещества (ибо только оно является источником ОВ в воде) к концентрации рассматриваемых питательных веществ в воде. В существующих пределах содержания (0,5—3,0 мг/л) в воде Псковско-Чудского озера калий не оказывает какого-либо влияния на увеличение содержания ОВ (табл. 2). Зато группа, изображенная в верхней части диаграммы скоплением точек, весьма чутко реагирует на изменение содержания фосфора и азота в воде. Развитием каких организмов вызваны наблюдаемые эффекты, должны выявить дальнейшие исследования.

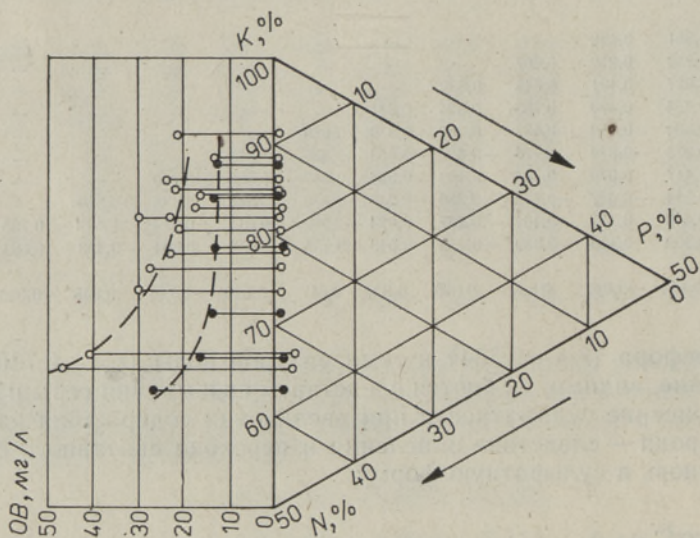


Рис. 28. Зависимость содержания органических веществ от относительного совокупного содержания в воде питательных элементов К, N и P (их суммарное содержание принято за 100%).

Таким образом, опыт совместных комплексных исследований на Псковско-Чудском озере, выполненных ИХБФ и ИЗБ АН ЭССР летом 1985 г., и использования современной вычислительной техники при обработке и интерпретации полученных результатов, оказался плодотворным. Были получены новые интересные данные, частично приведенные выше, позволившие наметить некоторые новые направления для дальнейшего изучения гидрохимии и биогеохимии Псковско-Чудского озера и антропогенного влияния на его состояние.

ЛИТЕРАТУРА

- Капутерко С. А., Соколов А. А., Филатова Т. И. Состояние и перспективы исследований экосистем Чудско-Псковского озера. — В кн.: Проблемы исследования крупных озер. Л., 1985, 155—159.
- Линдпере А., Милиус А., Стараст Х. Хлорофилл «А» и общий фосфор в воде Чудско-Псковского озера. — Бюл. «Охрана окружающей среды». Инф. сер. XIV. 1986, № 2, 10—15.
- Максимович Г. А. Химическая география вод суши. М., 1955.
- Мязметс А. Х., Тийдор С. И., Локк С. И., Лаугасте Р. А., Тимм В. И., Мязметс А. А. Состояние Чудско-Псковского озера на основе данных комплексной гидробиологической экспедиции 1980 г. — В кн.: Проблемы исследования крупных озер. Л., 1985, 159—162.
- Саава А. Оценка качества воды и требования по ее защите. Методические указания. Таллин, 1981.
- Симм Х. А. Гидрохимия поверхностных вод Эстонии. Таллин, 1975.
- Филатова Т. И. Основные черты циркуляции вод Чудско-Псковского озера. — В кн.: Проблемы исследования крупных озер. Л., 1985, 167—171.
- Чудско-Псковское озеро. Л., 1983.

Институт химической и биологической физики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
29/VIII 1986

Институт зоологии и ботаники
Академии наук Эстонской ССР

Arno PIHLAK, Ello MAREMÄE, Aini LINDPERE, Anu MILIUS, Henno STARAST

PEIPSI-PIHKVA JÄRVE VEE HÜDROKEEMILISEST SEISUNDIST 1985. AASTA JUUNIS

1985. aasta juunis tehtud Peipsi-Pihkva järve hüdrokeemilises uuringus määrati 27 erinevast vaatluspunktist võetud veeproovidele peamised füüsikalised (t° , pH, läbipaistvus jt.) ja keemilise koostise (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Fe_{ild} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , O_2 , PO_4^{3-} , CO_2 , SiO_2 , orgaaniline aine, klorofüll) näitajad. Saadud andmed töödeldi elektronarvutil. Mõõdetud suurustele määrati paariskorrelatsiooni koefitsiendid jt. näitajad, Peipsi järve jaoks koostati hüdrokeemilised kaardid (joon. 3—26). Viimastest nähtub, et toiteelementide ($\text{N}+\text{P}+\text{K}$) sisaldus on kõrgeim Peipsi järve lõunaosas põllumajanduslike väetiste poolset rikaste drenaažvete sissevoolukohtadel. Planktoni ja orgaanilise aine sisaldus on proportsionaalne P ja N kontsentratsiooniga, kuid ei sõltu K kontsentratsioonist. Vee karedus ja mineraalne sisaldus (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) on kõrgemad Peipsi põhjaosas. Fosfori väljavool Peipsi järvest on väiksem kui sissevool, tingituna sadenemisest koos orgaanilise ainega. Klorofüllil sisaldus on pöördvõrdeline sulfaatioonide kontsentratsiooniga, mis samuti suureneb põhja suunas.

Arno PIHLAK, Ello MAREMÄE, Aini LINDPERE, Anu MILIUS, Henno STARAST

HYDROCHEMICAL STATE OF LAKE PEIPSI-PIHKVA IN JUNE 1985

A complex hydrochemical study of the L. Peipsi-Pihkva involving determination of the main physical characteristics (t° , pH, turbidity) and chemical composition (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Fe_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_2^- , NO_3^- , O_2 , PO_4^{3-} , CO_2 , SiO_2 , organic matter, chlorophyll) of the lake water at 27 evenly distributed locations, as well as computer modeling and data cross-correlation, was carried out in June 1985. The chemical composition data are presented as computer-generated contour maps, see Figs 3—26. It follows that the nutrient ($\text{N}+\text{P}+\text{K}$) content is largest in the southern part of the Peipsi euphotic zone due to influx of drainage water, rich in agricultural fertilizers. The content of several kinds of phytoplankton and organic matter is proportional to P and N concentration, but not related to K. Water hardness and mineral content (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) is larger in the northern part of L. Peipsi. Phosphorus outflow is smaller than influx due to precipitation with decaying organic matter. Chlorophyll content is inversely proportional to the concentration of sulphate ions, which also increases towards the north.