

Сезонная динамика содержания взвешенного вещества в водах озера Ханка

В.С. Филимонов, А.Д. Апонасенко*

*Институт вычислительного моделирования СО РАН
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44*

Поступила в редакцию 13.07.2012 г.

По результатам обследования получены карты-схемы распределения минеральной взвеси в водах оз. Ханка в летний, весенний, осенний и зимний периоды года. Проведенный анализ позволил выявить сезонные отличия в распределении минеральной взвеси по акватории озера и показал, что его экосистема функционирует при ритмичном годичном цикле изменения концентрации взвеси.

Ключевые слова: поверхностные воды, мутность, минеральная частица, глина; surface water, turbidity, mineral particle, clay.

Озеро Ханка является самым крупным на Дальнем Востоке России. Оно расположено на севере Приморского края. Площадь озера непостоянна и меняется в зависимости от климатических условий. В максимуме она достигает 5010 км², в минимуме — 3940 км². Длина озера около 90 км, наибольшая ширина 67 км. В озеро впадают 24 реки, вытекает только одна — Сунгач, которая соединяет его с р. Уссури и далее с Амуром. Озеро мелководно. Его глубина не превышает 10,5 м, а средняя глубина составляет 4,5 м, преобладают глубины 1–3 м. Водосборный бассейн озера составляет 17,5 тыс. км².

Приханкайская низменность и, собственно, юго-западные берега озера представляют собой заболоченную местность с характерными для озера плавнями — растительными сообществами, образованными различными видами осок и злаковых. Они формируют прочную дернину, покрывающую водное зеркало на многие десятки квадратных километров. Питание озера преимущественно дождевое. В среднем сток в озеро составляет 1,99 км³ за год, из озера — 1,7 км³.

По акватории озера проходит государственная граница с Китаем, так что небольшая часть озера находится на его территории. Вода в озере мутная, что объясняется частыми ветрами, приводящими к сильному перемешиванию вод. Наибольшее зарегистрированное содержание взвешенного вещества (M) наблюдалось вблизи берега (167 г/м³), а в центре озера при сильных ветрах M может достигать 145 г/м³. В зимний период M постепенно снижается примерно до 10 г/м³.

По нашим наблюдениям взвешенные вещества не оседали на дно в отобранных пробах воды более 2 нед, что свидетельствует о высоком содержании в водах озера мелкодисперсного глинистого материала. В донных осадках самое большое поле с содержанием глин наблюдается в северной части озера. Значительный участок донных отложений с высоким содержанием глин расположен в западной части озера против устья р. Комиссаровки. По характеру протекающих в озере гидродинамических процессов оно может быть отождествлено с обширной береговой отмелью.

Волновым перемешиванием охвачена вся толща воды, а взмученный тонкодисперсный материал, поступающий со стоком рек, не способен осесть на дно. Большая часть взвешенного вещества выносится из озера со стоком р. Сунгач, чему способствуют мелководье в этом районе озера и усиленный ветровой режим. В то же время содержание фракции взвеси с размером частиц менее 0,001 мм в донных отложениях озера значительно меньше, чем в других крупных озерах, как, например, в Ладожском и Онежском. Галечники в донных отложениях озера распространены в северо-западной и восточной его частях [1, 2].

По содержанию взвешенного вещества близким к его величинам в оз. Ханка можно отметить озера: Литл-Стар (США), Джордж (Австралия), Чапала (Мексика), Сент-Луисия (ЮАР). Так, в оз. Чапала вариации содержания взвешенного вещества составляют 19–109 мг/л при среднем значении 30 мг/л [3]. В основном в озерах содержание взвешенного вещества имеет меньшие значения. В оз. Онтарио [4] концентрация минеральной взвеси варьировала от 0,2 до 8,9 мг/л. Концентрация минеральной взвеси в водах Ладожского озера по данным [5] изменялась в диапазоне 0,2–3,2 мг/л, а в [6] отмечены вариации от 4,2 до 12 мг/л.

* Владимир Степанович Филимонов; Анатолий Дмитриевич Апонасенко (apon@icm.krasn.ru).

В задачи настоящего исследования входили получение карт-схем распространения минеральной взвеси по акватории озера в летний, осенний, зимний и весенний периоды года, оценка содержания и размера частиц взвешенных веществ, сбрасываемых основными реками, дающими наибольший приток воды в озеро. Отбор проб выполнялся с борта лодки либо катера. Измерения вертикального распределения взвеси на различных станциях (по глубине, местоположению) не выявили значимых различий в содержании взвеси по глубине. Поэтому, в основном, пробы отбирались с глубины от 0–0,5 м.

Для выполнения поставленных задач были использованы оптические методы. Измерение гидрооптических характеристик проб воды, отобранных в различных районах озера, проводилось на спектрофотометре ДСФГ-2 [7]. Спектрофотометр предназначен для измерения первичных гидрооптических характеристик (показателей поглощения, ослабления и рассеяния света), дифференциальных спектров поглощения и рассеяния, интегральных индикатрис рассеяния света. Прибор построен по двухканальной схеме. В нем измеряется разность двух модулированных световых потоков, проходящих через объемы с исследуемой и эталонной средами. Область спектральной чувствительности прибора 400–800 нм. Средняя чувствительность в единицах оптической плотности составляет 0,0001.

На основании исследования различных внутренних водоемов показано, что общее содержание взвешенного вещества M ($\text{г}/\text{м}^3$) в воде связано с показателем рассеяния света σ (м^{-1}) на длине волны $\lambda = 550$ нм регрессионным уравнением

$$M = 1,46\sigma + 0,52.$$

Для оценки средних размеров частиц выполнялись измерения интегральной индикатрисы рассеяния при непрерывном изменении угла приемника света от $30'$ до 40 – 60° . Определялся угол θ , при котором рассеяние составляло 0,5 от максимальной зарегистрированной величины, и находился средний диаметр взвеси по формуле $d = 0,56\lambda/\theta n$, где n – показатель преломления среды (θ – в радианах). Исходя из среднего диаметра частиц взвеси, находят объем, площадь поверхности и масса одной частицы (v , s , m):

$$v = \pi d^3/6; \quad s = \pi d^2; \quad m = \rho v = \pi \rho d^3/6,$$

где ρ – плотность вещества частиц. Количество взвешенных частиц в единице объема среды $N = M/m$. Площадь поверхности частиц в объеме составит

$$S = Ns = 6M/\rho d.$$

Плотность минеральных частиц при оценке параметров взвеси $\rho = 2500$ $\text{кг}/\text{м}^3$ принята в соответствии с плотностью глины, образующей в озере основную массу взвешенных частиц. Площадь граничной поверхности выражается в $\text{м}^2/\text{м}^3$ [7].

Особенностью экосистем с высоким содержанием взвешенных в воде минеральных частиц явля-

ется их высокая биологическая продуктивность. Одна из наиболее общих и аргументированных идей, объясняющих этот факт, состоит в том, что интенсивность физических, химических и биологических процессов не распределена равномерно в толще воды. Она сосредоточена в небольшом объеме вод, зоне активной трансформации вещества и энергии, прилегающей к граничной поверхности [8–10]. Причем взвеси составляют самую большую по площади граничную поверхность в океане, а тем более во внутренних водоемах.

Этот сложный комплекс частиц биологического и абиогического происхождения пронизан сетью разнообразных взаимосвязей и формирует дисперсную биогеохимическую структуру водоема, определяющую круговорот вещества и энергии и оказывающую значительное влияние на функционирование экосистемы в целом. Количественные оценки активизации процессов, происходящих в пограничных зонах, по отношению ко всему водоему невозможны без знания распределения взвеси по его акватории и объема зоны влияния, сформированного этой границей.

Исследования показали, что в лессовых водоемах средняя по акватории концентрация взвешенных неорганических частиц более чем на порядок превышает концентрацию бактериопланктона. Следовательно, можно утверждать, что в лессовом водоеме ни фито-, ни бактериопланктон не оказывают какого-либо существенного влияния на изменение показателя рассеяния. Полученные при этом оценки размеров частиц сестона представляют собственно оценку среднего размера частиц органоминеральной взвеси [11].

Согласно приведенному краткому описанию распределения донных отложений по дну озера и большому влиянию волнения на взмучивание донных осадков и их распределение по всей водной толще следовало ожидать, что максимальная мутность будет наблюдаться в летний или осенний периоды при максимальном воздействии на воды озера ветрового перемешивания. В зимний период, когда озеро находится под ледовой защитой и вследствие этого влияние ветрового перемешивания минимально, содержание взвешенного вещества будет существенно уменьшаться.

Карта-схема расположения станций обследования озера приведена на рис. 1. В зависимости от погодных условий при отборе проб, с целью уточнения измеряемых характеристик, могли вводиться дополнительные станции.

Исходя из приведенного описания характера донных отложений и воздействия волнения на процессы взмучивания, начало работ приурочено к периоду открытой воды. На рис. 2 приведено распределение мутности по акватории озера в июле.

Наибольшее содержание взвеси обнаружено в трех районах – северо-восточной и северо-западной частях озера и на прибрежном участке южнее р. Комиссаровки до р. 1-й Ерик, и составляет 85–100 $\text{мг}/\text{л}$. Как отмечалось выше, в этом районе озера донные осадки представлены глинами, мелким алевритом,



Рис. 1. Карта-схема расположения станций. Римские цифры – номера гидрологических разрезов (местных гидрологов)

глинистым алевритом. Большая часть акватории озера характеризуется значительным содержанием взвешенного вещества (65–85 мг/л). Таким же содержанием взвешенного вещества характеризуются меньшие по площади районы севернее р. Грязнухи и участок на стыке заливов рр. Мельгуновки, Сиваковки и Иистой. Меньшие значения концентрации минеральной взвеси от 25 до 45 мг/л отмечены вдоль восточного побережья озера севернее р. Спасовки, вдоль южного побережья от р. Иистой до р. Спасовки и вдоль западного побережья южнее р. Тур до р. 1-й Ерик. Эффективный диаметр частиц в озере варьирует от 0,5 до 1,5 мкм. Вдоль западного побережья до р. Мельгуновки размер частиц меньше и колеблется от 0,85 до 1 мкм.

В осенний период распределение содержания взвешенного вещества по акватории озера становится более равномерным (рис. 3).

Практически на всей центральной части озера, за исключением участка, примыкающего к устью р. Гнилой, содержание взвешенного вещества составляет от 45 до 65 мг/л. В устье реки – менее 25 мг/л, а по мере удаления от устья на запад содержание взвешенного вещества увеличивается до 25–45 мг/л и узким языком проходит до центральной части озера. Меньшие величины содержания взвеси в этом районе, очевидно, связаны с выносом взвеси со стоками р. Сунгач. Значительные изменения содержания взвешенного вещества зафиксированы в южной части озера.

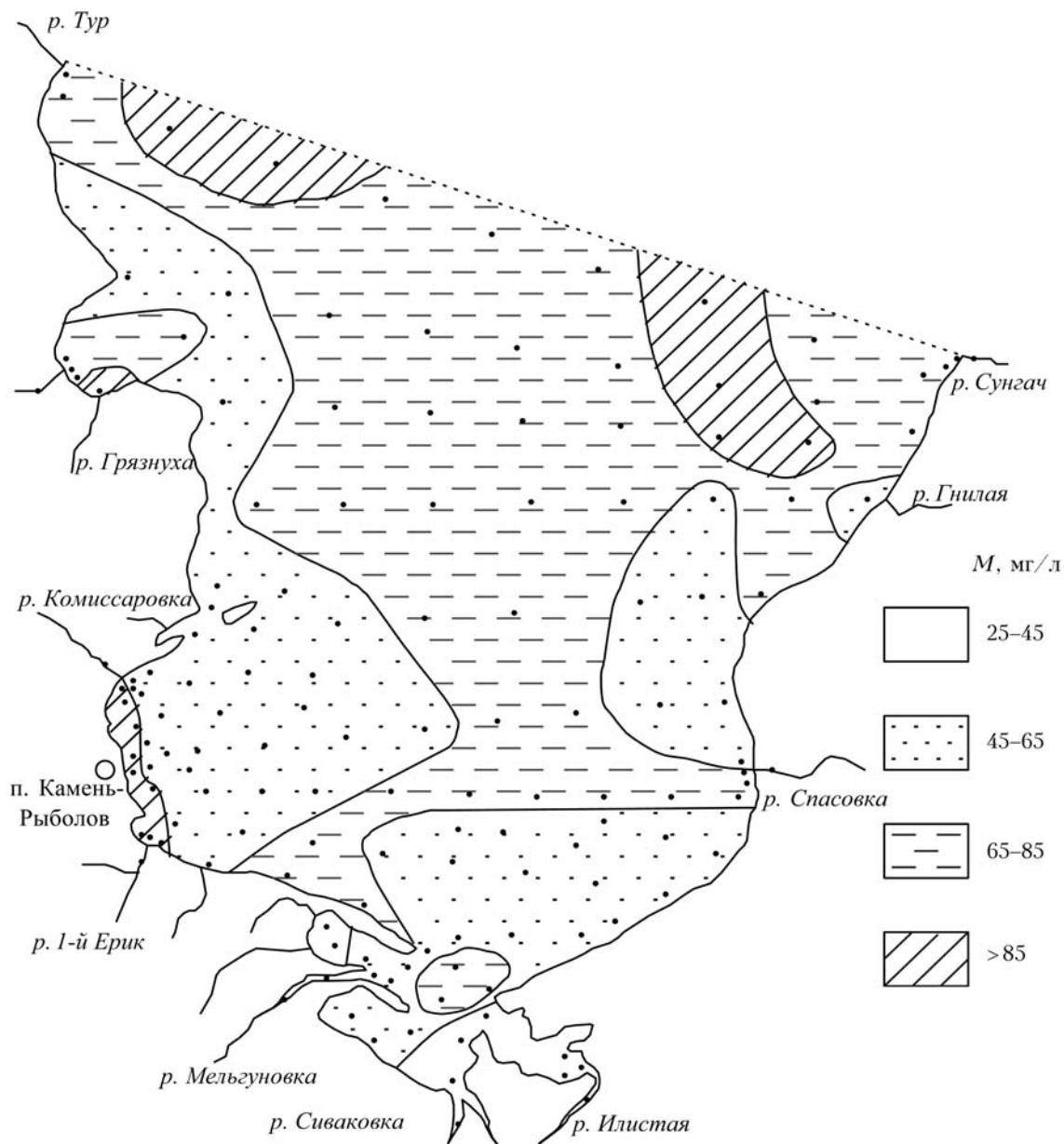


Рис. 2. Распределение содержания взвешенного вещества по акватории озера в летний период

Максимальное содержание взвешенного вещества (более 85 мг/л) зафиксировано в южной, практически прибрежной части озера, распространяющейся лентой от р. 1-й Ерик до выхода залива р. Мельгуновки. Участок с максимальной концентрацией взвеси окружает участок с меньшим M от 65 до 85 мг/л. Пониженное содержание взвешенного вещества от 25 до 45 мг/л обнаружено у юго-западного берега озера от устья залива р. Иистой практически до устья залива р. Спасовки.

Небольшая часть акватории озера, расположенная на северо-востоке, не была обследована из-за длительных осенних штормов. Таким образом, в период открытой воды в озере не наблюдается стабильной картины распределения взвешенного вещества, но в центральной части озера содержание

взвеси постепенно падает. По-видимому, это связано со стоком части взвеси с водами р. Сунгач. В значительной мере, особенно в прибрежных водах, где взвесь поступает в озеро с водами рек, на содержание взвеси значительно влияют направление и сила ветра в конкретном районе из-за более интенсивного перемешивания вод, поднимающего осевшие минеральные частицы.

В зимний сезон озеро покрыто льдом. Содержание взвешенного вещества озера в этот сезон менее 25 мг/л и только в устье р. Спасовки незначительно выше. В водах озера, покрытых льдом, турбулентность минимальна, и минеральные частицы, находившиеся в толще воды и вновь поступающие с водой притоков, постепенно оседают на дно озера.

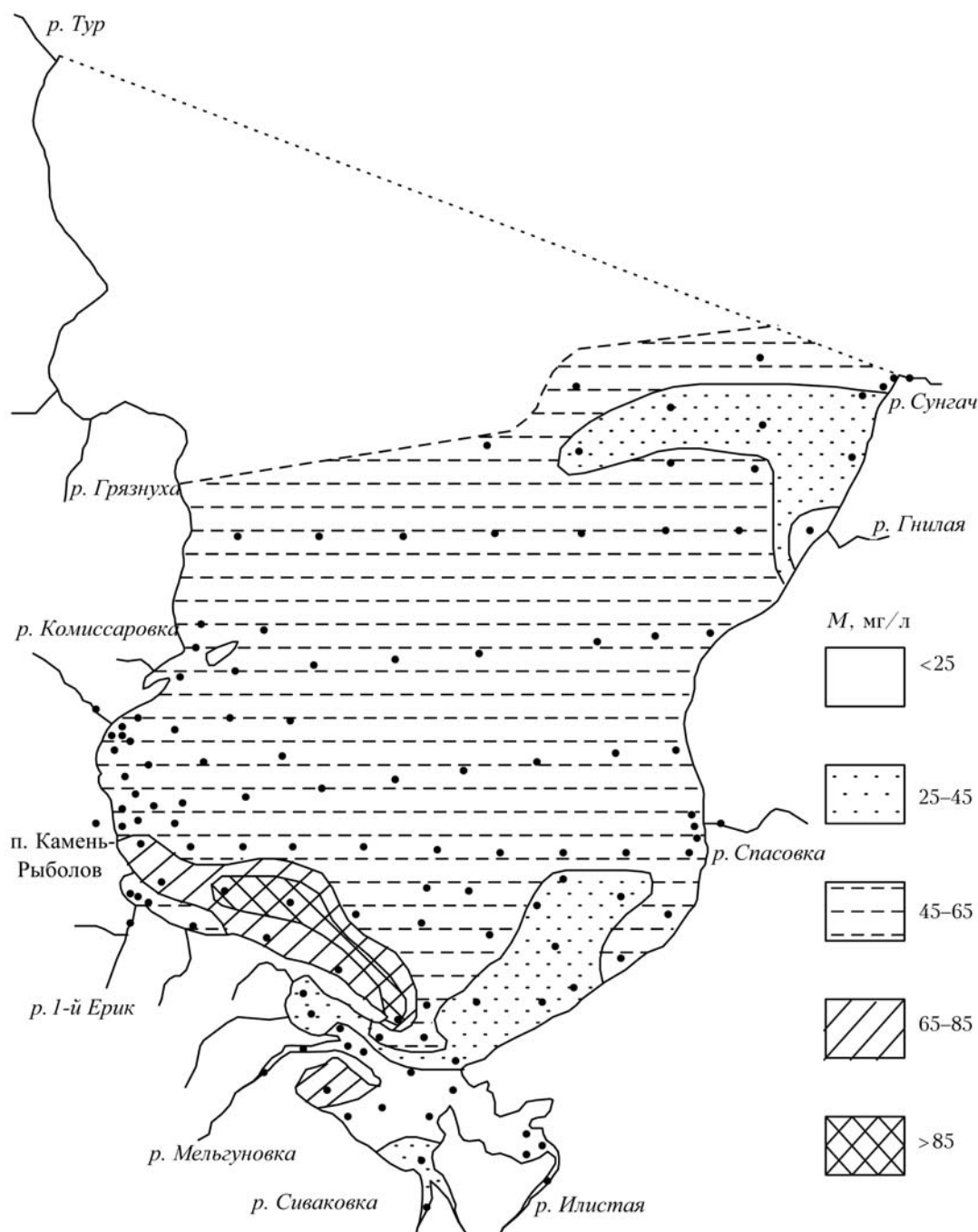


Рис. 3. Распределение содержания взвешенного вещества по акватории озера в осенний период

При проведении измерений в весенний период значительная область в центральной части озера была покрыта льдом, что препятствовало отбору проб. Но в весенний период нас интересовало поведение взвеси, осевшей на дно озера, когда оно длительный период было покрыто льдом и ледяной покров только начал освобождать береговую часть озера. При действии ветров на освободившиеся ото льда участки открытой воды существенно возросла ее турбулентность и осевшая в зимний период взвесь стала подниматься к поверхности озера.

Распределение взвеси в водах озера весной более хаотично, чем в летний и осенний периоды.

Очевидно, распределение взвешенного вещества в этот период определяется тем, как происходят перенос и осаждение оставшейся и вновь поступившей взвеси с водами рек (медленными течениями) под ледовым покровом. Четко выделяется приустьевый участок р. Грязнухи, характеризующийся очень высоким содержанием взвеси и малым ее содержанием в прилегающих к этому участку водах озера. Малым содержанием взвеси характеризуются приустьевые участки озера рр. Комиссаровки, Илистой и Спасовки.

Распределение взвешенного вещества в весенний период представлено на рис. 4.

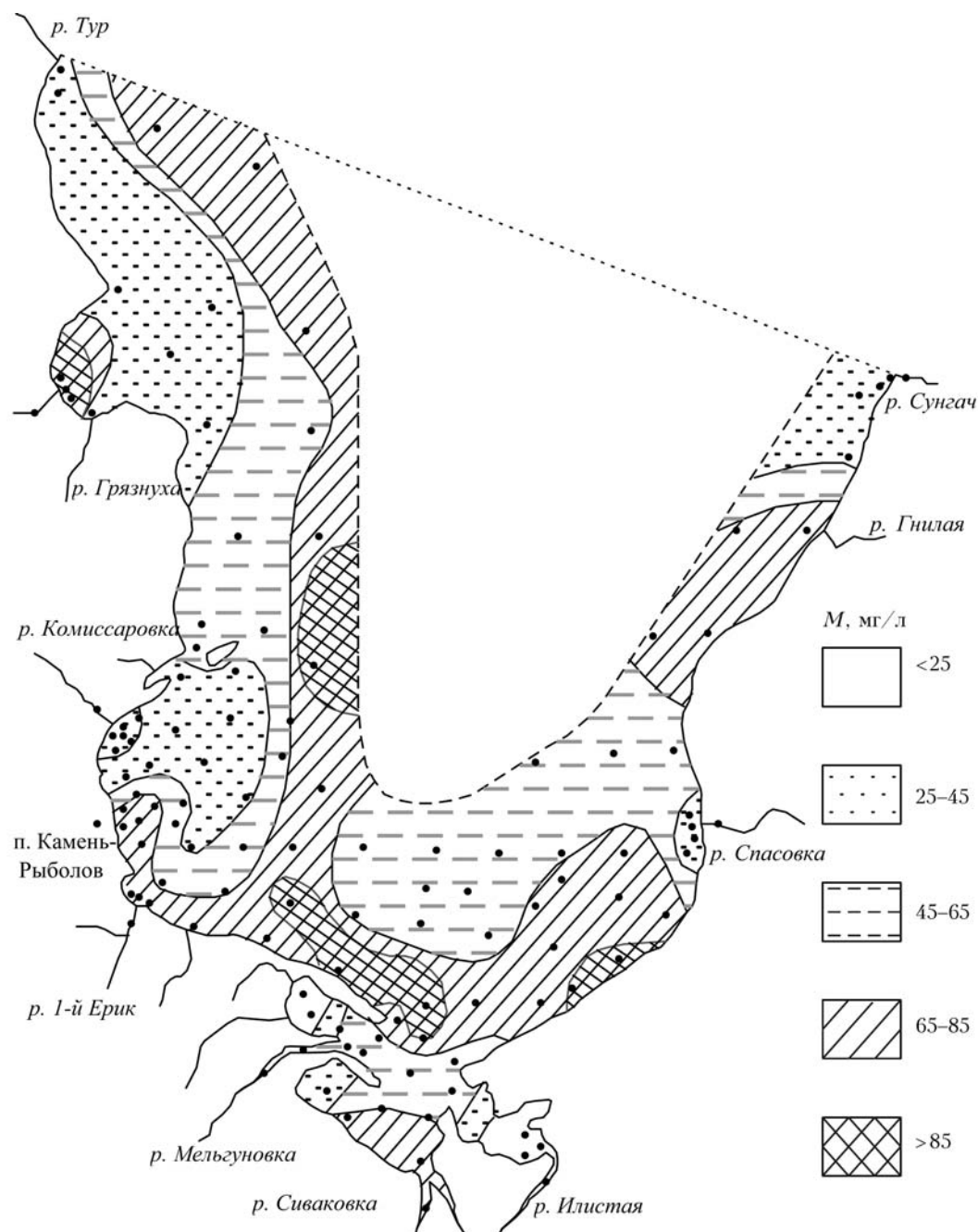


Рис. 4. Распределение содержания взвешенного вещества по акватории озера в весенний период

Реки, впадающие в озеро, несут в летний период значительно меньшее количество взвесей (до 25 мг/л). Наиболее чистым притоком является р. Илистая (всего 7 мг/л), малый уклон стока которой приводит к существенному осаждению взвесей. Наиболее крупная фракция попадает в озеро с притоками рр. Мельгуновки, Спасовки, Сиваковки. В связи с этим в южной и юго-восточной частях озера размер частиц выше, чем в остальной части озера, и колеблется от 1 до 1,5 мкм. Таким образом, высокое содержание в водах озера взвеси с малым размером частиц может являться следствием абразивного эффекта воздействия крупнодисперсной взвеси на глинистые донные отложения и их посту-

пления со стоком рек вследствие медленного истирания частиц на дне озера в результате трения их друг о друга.

В табл. 1 приведены минимальные, максимальные и средние по озеру характеристики минеральной взвеси и ее параметры.

В периоды проведения обследований озера (май, июль и октябрь) средняя концентрация минеральной взвеси в водах озера остается очень высокой и существенно снижается только в то время, когда поверхность озера (февраль и март) покрыта льдом. При этом максимальная концентрация взвеси наблюдается в мае, когда озеро в прибрежных районах начинает освобождаться от ледового покрова.

Таблица 1

Характеристики взвешенного вещества в водах озера

Сезон	Взвешенные вещества, мг/л	Средний диаметр частиц, мкм	Расстояние между частицами, мкм	Концентрация частиц, · 10 ⁹ част/л	Граничная поверхность, м ² /л	S/V, · 10 ⁶ 1/м
Февраль–март	2,3 – 31,3	0,17 – 1,51	9 – 81	2 – 1100	0,01 – 0,11	4 – 35,0
	7,5	0,72	41	49	0,03	10
Май	12,8 – 154,0	0,91 – 1,56	25 – 63	3,7 – 53,0	0,03 – 0,27	3,8 – 6,6
	62,5	1,24	35	24,0	0,12	4,9
Июль	20,2 – 130,6	0,83 – 1,57	22 – 52	7 – 80	0,04 – 0,25	3,8 – 7,2
	64,0	1,15	31	34	0,13	5,3
Октябрь	8,9 – 128,4	0,69 – 1,51	21 – 64	4 – 96	0,02 – 0,23	4,0 – 8,7
	50,8	1,06	32	35	0,12	5,8

Примечание. В числителе – пределы величин, в знаменателе – среднее значение, V – объем всех частиц.

Для проверки изменчивости характеристик в течение исследуемых периодов (сезонов) на нескольких станциях были рассчитаны вариационно-статистические элементы (табл. 2).

Повышенные коэффициенты вариации наблюдаются для расчетных параметров: для расстояния между частицами и концентрации частиц. Возможно, это связано с методическими погрешностями. Для остальных характеристик вариации находятся в пределах 6–25%, т.е. характеристики для конкретных станций довольно стабильны для каждого из сезонов.

Под действием ветровой нагрузки растет турбулентность вод, в результате минеральная взвесь, поступившая с водами рек в зимний период, и взвесь, получившаяся в процессе постепенного истирания глинистых отложений на дне озера мелким каменным материалом, осевшие на дно озера, когда оно было покрыто льдом, вновь поступают в водную толщу. В это же время в половодье со стоком р. Сунгач происходит значительный сброс минеральной взвеси с водами озера в р. Уссури. Несмотря на то что в весенний период происходит большой сброс минеральной взвеси, ее концентрация в заливе р. Сунгач остается значительной и в летний (65–85 мг/л) и осенний (45–65 мг/л) периоды. Это можно объяснить близким расположением

к заливу реки в северной части озера донных глинистых отложений, материал разрушения которых пополняет количество минеральной взвеси в этом районе озера. Таким образом, р. Сунгач является естественным регулятором концентрации минерального компонента в воде озера, а изменение объема ее стока будет оказывать значительное влияние на концентрацию взвеси в водах озера и, соответственно, на функционирование всей его экосистемы.

В ходе работ были обследованы и воды большинства рек в их нижнем течении, несущих в озеро сколь-нибудь существенную долю минеральной взвеси.

Из табл. 3 видно, что реки несут в озеро максимальное количество минеральной взвеси в весенний и летний периоды (43,3 и 49,7 мг/л). В феврале – марте земля еще не оттаяла и количество выносимой с водой рек взвеси мало. В осенний период взвесь уже в основном вымыта из береговых и донных отложений и ее содержание в воде рек существенно уменьшается. В зимний период почва вдоль русла рек, смоченная водой, замерзает. Лед прочно схватывает и удерживает замерзшую почву, но в то же время, поскольку объем льда в замерзшей почве больше объема воды, лед разрушает почву. В весенний период растаявшая и размельченная почва выносится половодьем в озеро.

Таблица 2

Статистические параметры, рассчитанные по измерениям на ст. 113

Сезон	Взвешенные вещества, мг/л	Средний диаметр частиц, мкм	Расстояние между частицами, мкм	Концентрация частиц, · 10 ⁹ част/л	Граничная поверхность, м ² /л	S/V, · 10 ⁶ 1/м
Февраль–март	4,7 ± 1,1	0,42 ± 0,08	23 ± 4	90 ± 44	0,045 ± 0,009	14,7 ± 2,6
	14,9	19,2	18,0	48,7	20,9	17,5
Май	92,0 ± 23,2	1,24 ± 0,08	29 ± 2	35 ± 6	0,177 ± 0,036	4,9 ± 0,3
	25,2	6,1	6,4	16,9	20,4	5,9
Июль	70,4 ± 1,1	1,10 ± 0,13	29 ± 2	40 ± 11	0,152 ± 0,025	5,5 ± 0,7
	23,5	11,7	7,5	28,5	16,3	12,2
Октябрь	59,9 ± 11,6	0,94 ± 0,12	26 ± 2	55 ± 15	0,151 ± 0,022	6,5 ± 0,8
	19,4	12,6	8,3	28,0	14,7	12,7

Примечание. В числителе – средние значения характеристики ± стандартное отклонение (среднеквадратическое), в знаменателе – коэффициент вариации, %.

Характеристики взвешенного вещества в воде рек, впадающих в озеро

Сезон	Взвешенные вещества, мг/л	Средний диаметр частиц, мкм	Расстояние между частицами, мкм	Концентрация частиц, · 10 ⁹ част/л	Граничная поверхность, м ² /л	$S/V, \cdot 10^6$ 1/м
Февраль–март	5,0 – 39,2	0,18 – 1,27	11 – 72	3 – 630	0,01 – 0,11	4,7 – 33,0
	11,9	0,73	38	110	0,04	12,0
Май	13,1 – 100,2	1,17 – 1,37	31 – 57	2,9 – 16,0	0,02 – 0,18	4,4 – 5,1
	43,3	1,25	42	4,9	0,08	4,8
Июль	22,5 – 77,1	1,03 – 1,50	30 – 49	8 – 49	0,04 – 0,13	4,0 – 5,8
	49,7	1,25	37	21	0,09	4,8
Октябрь	7,9 – 57,2	0,65 – 1,59	26 – 68	3 – 54	0,02 – 0,15	3,8 – 9,2
	19,3	1,14	50	14	0,04	5,6

Примечание. В числителе – пределы величин, в знаменателе – среднее значение.

Таким образом, экосистема озера функционирует в режиме постоянной годичной смены концентрации минеральной взвеси. Решающую роль в этом процессе играет сток минеральной взвеси с водами единственной р. Сунгач, вытекающей из озера. В зимний период с водами реки идет длительный и постоянный сброс мелкой минеральной взвеси, удерживающейся в водах озера даже при минимальной турбулентности. В весенний, летний и осенний периоды происходит интенсивный сброс взвеси, поднятой со дна озера усиленным волнением и полученной в его северной части за счет истирания крупными частицами донных глинистых отложений.

1. *История* Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки / Под ред. Д.Д. Квасова, Г.Г. Мартинсона, А.В. Раукаса. Л.: Наука, 1989. 280 с.
2. *Большая советская энциклопедия*. М.: Сов. энцикл., 1969. 1978.
3. Lind O.T., Chrzanowski T.H., Dávalos-Lind L. Clay turbidity and the relative production of bacterioplankton and phytoplankton // *Hydrobiologia*. 1997. V. 353, iss. 1–3. P. 1–18.
4. Bukata R.P., Bruton J.E., Jerome J.H., Jain S.C., Zwick H.H. Optical water quality model of lake Ontario:

2. Determination of chlorophyll-a and suspended mineral concentrations of natural waters from submersible and low altitude optical sensor // *Appl. Opt.* 1981. V. 20, N 9. P. 704–714.
5. Румянцев В.Б., Короткевич О.Е., Юдин Е.А. Оптически активные компоненты вод Ладожского озера // *Комплексный дистанционный мониторинг озер*. Л.: Наука, 1987. С. 47–51.
6. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Оптические свойства природных вод и дистанционное зондирование фитопланктона. Л.: Наука, 1988. 181 с.
7. Лопатин В.Н., Апонасенко А.Д., Щур Л.А. Биофизические основы оценки состояния водных экосистем (теория, аппаратура, методы, исследования). Новосибирск: Изд. СО РАН, 2000. 352 с.
8. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. 376 с.
9. Айзатуллин Т.А., Лебедев В.Л., Хайлов К.М. Океан. Активные поверхности и жизнь. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 192 с.
10. Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Филимонов В.С., Щур Л.А. Изучение структуры водных экосистем на основе границ раздела фаз взвесь–вода // *Сиб. экол. ж.* 1996. № 5. С. 387–396.
11. Щур Л.А., Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Филимонов В.С. Оценка качества воды в оз. Ханка по некоторым биологическим показателям // *Водные ресурсы*. 1994. Т. 24, № 1. С. 74–78.

V.S. Filimonov, A.D. Aponasenko. Seasonal dynamics of suspended matter in waters of lake Khanka.

Outline maps of the distribution of mineral suspension in waters of the lake Hanka in summer, spring, autumn, and winter seasons have been created. The analysis revealed seasonal differences in the distribution of mineral suspension of the lake and showed that the lake ecosystem is functioning under a constant rhythmic annual cycle of changing the concentration of the suspended matter.