

РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ВОДО- И СОЛЕОБМЕНА ЧЕРЕЗ ПРОЛИВ В ВОДНОМ И СОЛЕВОМ БАЛАНСЕ ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ ЛИМАНА

Роль и значение водо- и солеобменных процессов в проливе своеобразны. Главная роль принадлежит двухслойному обмену, дискретный обмен может рассматриваться как непрерывный двухслойный. Предложен оригинальный способ оценки и расчета водо- и солеобмена для стационарных и неустановившихся условий.

Ключевые слова: водные массы, корреляция, гидродинамика, поверхность нулевых скоростей, галоклин, методы расчета.

Введение в проблему. Роль и значение водо- и солеобменных процессов в проливе может быть разнообразной. Степень участия различных видов обмена между лиманом и морем по наблюдениям неодинаковая: главная роль принадлежит двухслойному обмену, дискретный обмен представлен непродолжительными и крайне неустановившимися фазами, роль трехслойного обменного процесса водами и солями видимо незначительная, наблюдениями фиксируется только иногда. Оценка этого водообмена возможна путем получения аналитических зависимостей на основе решения гидродинамических уравнений, или их численного решения, также решения системы уравнений водного и солевого балансов. Во всех случаях необходимо сравнение теоретических результатов и данных натурных измерений. Здесь не все благополучно, проблема связана с получением надежных полевых данных для двумерных проливов, характеристиками которых являются их ширина и глубина. Все лиманы северо-западной части Черного моря имеют двумерную возвратно-поступательную гидравлическую связь с морем, чрезвычайно динамичную, почему использование уравнений гидродинамики, для оценки водо- и солеобменных процессов в сечении пролива, весьма проблематично. Для оценки и водо- и солеобменов через пролив нужны новые подходы, использование нетрадиционных характеристик этих процессов.

Исходные данные. Исходными данными являются суточные станции гидрометеорологических наблюдений, выполненные СО ГОИНа в Кинбурнском проливе в июле и сентябре 1971 г, стандартными морскими приборами, тремя судами одновременно.

Непосредственные измерения показывают, что режим течений и солености вод в сечении пролива очень динамичный. Данные оказались непригодными для получения качественных обобщенных гидрологических характеристик (расходов воды, солей и др.) свидетельствующих о размере и режиме водо- и солеобменных процессов через пролив.

Метод исследования. Натурные наблюдения отдельных сторон балансовых составляющих показал, что они представляют собой случайные величины. Их анализ возможен, когда их количество наберет достаточную массу для проявления этими величинами их устойчивых вероятностных свойств, таких, например, как средние значения. Проверками определено, что усреднение гидрологических характеристик возможно и достаточно на суточных промежутках. В этом случае среднесуточные характеристики являются статистически значимыми, как в отношении длительности ежечасных измерений на отдельных гидрологических станциях, так и по сечению Кинбурнского пролива.

Солевой режим Днепровского лимана и наиболее осолоненной его части, зоны

смешения, формируется притоком речных вод и возвратно-поступательным обменом морскими и лиманными водами через пролив. Зона смешения может быть по типу клина соленых вод, который может преобразовываться под действием динамических факторов в полностью перемешанную по вертикали зону или частично перемешанную, т.е. фронтальную зону раздела лиманных (слабо осолоненных речных) и соленых морских водных масс.

Выяснено, что водо- и солеобмен между лиманом и морем определяется взаимным положением во всей зоне смешения, включая пролив, специфических поверхностей, позволяющих раскрыть механизм взаимодействия между морской, лиманной и речной водными массами.

Изменчивость водо- и солеобмена в проливе и во всей зоне смешения оценивалась своеобразным способом: во-первых, описанием динамики *поверхности нулевых скоростей*, разделяющих толщу зоны смешения и пролива по ее динамике; во-вторых, динамика толщи все той же зоны смешения и пролива, и их частей, рассматривалась с помощью другой специфической характеристики, - изменчивости *галоклина, поверхности скачка плотности*, разделяющего водные массы *по солености*. Динамика этих поверхностей отображает механизм формирования зоны смешения, расположенной в лиманной части устьевой области. Скачок плотности в толще зоны смешения, в данной работе, заменили изучением положения скачка солености на каждой вертикали, называемого галоклином, в предположении, что температурные характеристики в каждой водной массе (лиманной и морской), благодаря турбулентному перемешиванию, одинаковые.

Изучение взаимного перемещения на одной и той же вертикали скачка солености (галоклина) и поверхности нулевых скоростей, является, как оказалось, хорошим показателем изменчивости водо- и солеобмена через пролив.

Результаты исследований. Изучение роли и значения водо- и солеобмена через пролив в изменчивости динамики зоны смешения. Индикатором изменчивости количества солей в толще вод зоны смешения является, как говорилось выше, положение поверхности средней солености в ее толще, расположенной в галоклине. Эта поверхность отделяет массу солей на вертикали в осолоненной речной (лиманной) и морской водных массах h_s . Подъем этой поверхности однозначно указывает на возрастание количества солей в зоне смешения, опускание – о том, что масса солей в этой зоне уменьшается.

Увеличение и уменьшение объема воды в зоне смешения характеризуется положением в толще воды поверхности раздела поля скоростей. При возрастании притока речной воды в лиман и увеличении оттока лиманных вод поверхность раздела поля скоростей, на каждой гидрологической вертикали h_0 , опускается, увеличивая тем толщину слоя лиманной воды. При притоке морской воды в лиман, в проливе и зоне смешения она поднимается к поверхности, это было установлено ранее.

Разность между пересечением на каждой вертикали зоны смешения поверхности средних соленостей h_s и нулевых скоростей h_0 , определяется по формуле

$$\frac{h_s - h_0}{H} = \kappa \left(1 - \frac{V_p}{2V_m} \right), \quad (1)$$

где H - глубина; V_p - средняя скорость речной воды на вертикали в зоне смешения, V_m - средняя скорость морской воды на той же вертикали; κ - коэффициент формы русла (для Днепровского лимана этот коэффициент равен 0.16).

В установившихся условиях стратифицированной зоны смешения поверхность раздела поля скоростей h_0 всегда расположена ниже поверхности раздела скачка плотности (скачка солености h_s). Лабораторными экспериментами установлено, что

разность их местоположения на вертикали в установившихся условиях составляет относительную величину минус 0.12, [1].

Переход от установившегося режима обмена к неустановившемуся режиму не только водного, но и солевого, *обеспечивается быстрой перестройкой поля скоростей*. Мобилизация выноса соленых вод из лимана или поступления соленых вод в зону смешения осуществляется при этом перестройкой не поля солености, а главным образом, перемещением по вертикали границы раздела поля скоростей. Резкое увеличение выноса солей достигается такой перестройкой поля скоростей, при котором граница раздела h_0 опускается ниже ее положения, отвечающего установившимся условиям. Когда граница раздела поля скоростей достигнет дна, наступает момент однонаправленного (дискретного) обмена через пролив. Течение из лимана охватывает при этом все сечение пролива.

Рост поступления солей в лиман осуществляется при повышении поверхности раздела поля скоростей относительно положения ее в установившихся условиях. В предельном случае, когда поверхность раздела скоростей достигает открытой водной поверхности, тоже происходит замена непрерывного двухслойного обмена – однонаправленным, дискретным обменом вод через все сечение пролива.

В двухслойном противоположно направленном обмене таким образом скрыт однонаправленный, дискретный тип обмена. Скрытая форма существования дискретного обмена, однонаправленного по всему сечению, в непрерывном двухслойном, позволяет представить солевой режим зоны смешения, как постоянную смену фаз засоления и рассоления. Этот вид обмена выполняет также и негативную роль. При изучении процесса, дискретная форма, при привлечении уравнений гидродинамики для оценки водо- и солеобмена через пролив, является существенным ограничением для достижения положительных результатов.

Дискретный обмен, таким образом, выполняет частично роль общего случая двухслойного обмена между морем и лиманом. Следовательно, в отдельных случаях дискретный обмен может изучаться путем рассмотрения двухслойного водо- и солеобмена. Этот вывод весьма полезный, при теоретическом рассмотрении неустановившегося режима водо- и солеобмена в двухмерных проливах. Процессы засоления и рассоления в проливе представляют неустановившиеся фазы водно-солевого режима. Они могут описываться усредненными в каждой водной массе измеренными характеристиками, а так же уравнениями водного и солевого балансов с правой частью не равной нулю.

Поверхность, объединяющая точки со средней соленостью на каждой гидрологической вертикали (поверхность галоклина), обладает замечательным свойством, если $h_S - h_0 \geq -0.12$, приток воды и солей через пролив увеличивается в лиманной водной массе; в случае, если $h_S - h_0 < -0.12$ баланс воды и солей изменяется во времени в морской толще зоны смешения. В первом случае наблюдается уменьшение солености вод в зоне смешения, процесс ее рассоления: морской воды у дна поступает меньше, а в верхней лиманной части обеспечивается равенство притока и оттока речной воды поступающей в зону смешения. Во втором случае происходит процесс засоления, здесь концентрация солей в зоне смешения приходит в соответствие с возросшей соленой составляющей. Наблюдается вынос солей в верхней части водного сечения зоны смешения и проливе, и приток соленых вод в нижней, морской водной массе.

Гидрологические факторы, приводящие в действие механизм формирования зоны смешения, будем устанавливать (выявлять) по данным измерений характеристик водо- и солеобмена в Кинбурнском проливе, отысканных относительно скачка солености, табл.1. Зависимость гидрологических характеристик между собой будем

оценивать по коэффициентам линейной корреляции, в первую очередь *относительно скачка плотности* (значений средней солености) на каждой вертикали разреза через Кинбурнский пролив. Эти корреляции показаны в верхней части матрицы, табл. 2.

Таблица 1 - Осредненные по суточным интервалам времени характеристики водно-солевого обмена через Кинбурнский пролив, *относительно поверхности средней солености на каждой вертикали*

Дата	H , см Очаков	h_S , м	h_0 , м	$\frac{h_S - h_0}{H}$, H=10	V_L , см/с	V_M , см/с	V_L/V_M	$V_L/2V_M$	$\frac{h_S - h_0}{H}$, по (1)
22.VII.1971г.	472	3,7	7,0	-0,33	-14,5	2,4	6,04	3,02	-0,35
23.VII.1971г.	474	3,3	2,3	+0,10	-1,03	+10,0	0,10	0,05	0,152
24.VII.1971г.	473	3,4	4,0	-0,06	-10,7	+2,4	4,46	2,23	-0,20
25.VII.1971г.	472	4,4	2,4	+0,20	-0,74	+13,0	0,057	0,028	0,16
26.VII.1971г.	467	3,9	4,6	-0,07	-15,0	+6,0	2,5	1,75	-0,12
27.VII.1971г.	473	3,8	2,7	+0,11	-4,70	+8,5	0,56	0,28	0,115
28.VII.1971г.	472	4,0	4,0	0,0	-16,0	+6,0	2,67	1,34	-0,05
14. IX. 1971г	466	3,8	5,2	-0,14	-12,2	+0,82	14,9	7,45	-0,98
15. IX. 1971г	471	3,1	2,2	+0,09	-1,14	+7,8	0,15	0,075	0,148
16. IX. 1971г	471	3,2	4,2	-0,10	-9,00	+2,32	3,88	1,94	-0,15
18. IX. 1971г	464	4,6	4,5	+0,01	-10,4	+3,3	3,15	1,58	-0,09

Примечание:

H – Уровень на водпосту Очаков,

h_S – средняя глубина линии скачка плотности на разрезе через Кинбурнский пролив,

h_0 – средняя глубина линии нулевой скорости на разрезе через Кинбурнский пролив,

$(h_S - h_0)/H$ – относительная разность глубин линии скачка плотности и пинии нулевых скоростей, H – глубина на разрезе;

V_L – средняя скорость лиманной воды вытекающей из лимана,

V_M – средняя скорость поступления в лиман морской воды,

V_L/V_M – отношение средних обменных скоростей через гидрологический разрез в Кинбурнском проливе.

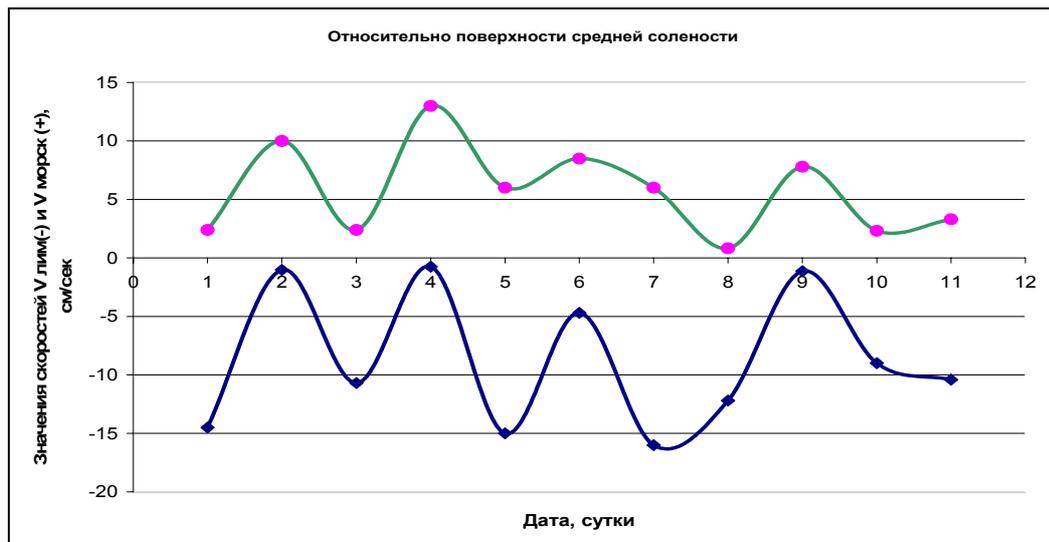


Рис. 1 - Изменение во времени среднесуточных скоростей течений, лиманных (-) и морских (+), проходящих через Кинбурнский пролив и усредненных *относительно скачка плотности*.

Из лимана, при двухслойном обмене, осолоненные речные воды (лиманные), вытекают в поверхностных слоях, а морские воды в лиман поступают в придонных.

Водо- и солеобмен между морем и лиманом имеет колебательный характер (рис.1, 2). Реверсивный характер обмена через поперечное сечение пролива хорошо заметен по изменчивости минимальных и максимальных средних скоростей течений, за время наблюдений усредненных по суточным интервалам.

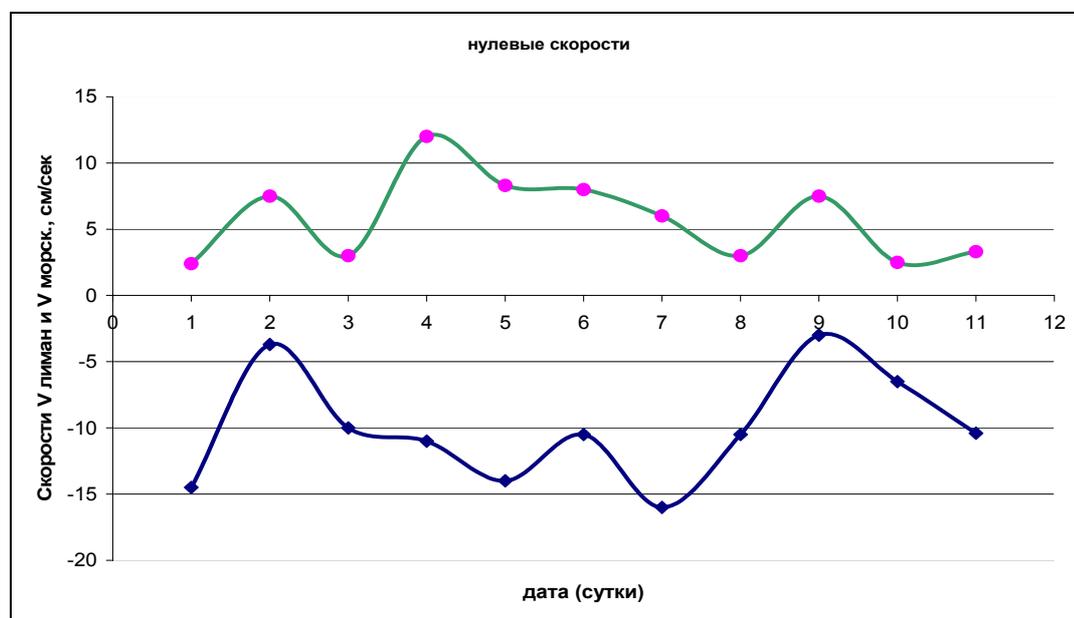


Рис. 2 - Изменение во времени среднесуточных скоростей течений, лиманных (-) и морских (+), в Кинбурнском проливе, усредненных относительно поверхности нулевых скоростей

Дискретная составляющая обмена устранена при суточном усреднении характеристик. Возвратно-поступательный водо- и солеобмен лучше проявляется при усреднении характеристик относительно галоклина, рис.1. Обмен морской водой через Кинбурнский пролив, в придонных его слоях, при этом менее динамичный (верхняя кривая на рис.1). Меньшая динамичность объясняется большей инерцией более плотной морской воды по сравнению со слабо осолоненной речной. Это становится еще очевиднее, когда скорости рассматриваются относительно поверхности их нулевых значений. В этом случае реверсивный характер заметен сразу и проявляется немного иначе, рис.2.

В табл.3 корреляции вычислены относительно линии скачка плотности и линии нулевых скоростей. В верхней половине матрицы значения корреляции подсчитаны по всем наблюдениям, включая бракованное - 14. IX. 1971г, а в нижней части с исключением брака в исходных данных. Из корреляций следует, что ошибочным значением, вероятно, является уровень воды на водпосту Очаков на эту дату. Подтверждение этому находим на рис.3: на первом графике бракованное значение присутствует, а другой построен при его изъятии. Построенные графики связи, отражающие особенности взаимозависимостей в каждом отдельном случае, показаны на рис. 3-11. Корреляция зависимости на первом графике рис.3 равна 0.17, а после исключения бракованного значения 0.91.

Таблица 2 - Корреляционная матрица: взаимозависимость характеристик водо- и солеобмена через Кинбурнский пролив, вычисленных относительно линии скачка плотности (линии средней солености) и линии нулевых скоростей

	H	h_S	h_0	$\frac{h_S - h_0}{H}$	V_L	V_M	V_L/V_M
H	1	-0.507	-0.391	0,225	0.402	0,448	-0.474
h_S	-0.507	1	0.163	0.164	-0.223	-0.142	0.028
h_0	-0.391	0.163	1	-0.947	-0,829	0.782	-0,709
$\frac{h_S - h_0}{H}$	0.225	0.164	-0.947	1	-0,756	0.859	-0.629
V_L	0.202	-0.611	-0.606	-0.406	1	0.723	-0.538
V_M	0.274	-0.225	0.708	0.782	0.780	1	0.752
V_L/V_M	-0.043	0.116	-0.764	-0.726	-0.526	0.588	1

Примечание: корреляции в верхней части матрицы вычислены, относительно поверхности скачка плотности (средней солености), нижняя - относительно поверхности нулевых значений скоростей

Таблица 3 - Корреляционная матрица гидрологических характеристик водо- и солеобмена через Кинбурнский пролив, вычисленных относительно линии скачка плотности, с учетом (верхняя часть матрицы) и исключением бракованного наблюдения (нижняя ее часть)

	H	h_S	h_0	$\frac{h_S - h_0}{H}$	V_L	V_M	V_L/V_M
H	1	-0,507	-0,391	0,225	0,402	0,448	-0,476
h_S	-0.509	1	0,163	0,164	-0,223	-0,142	0,028
h_0	-0.391	0.258	1	-0,947	-0,829	0,782	-0,709
$\frac{h_S - h_0}{H}$	0.483	0.163	-0.946	1	-0,756	0,829	-0,659
V_L	0.487	-0.247	-0.890	0.780	1	0,723	-0,538
V_M	0.520	0.139	-0.890	0.830	0.700	1	0,752
V_L/V_M	-0.524	0.030	-0.750	-0.750	-0.510	-0.740	1

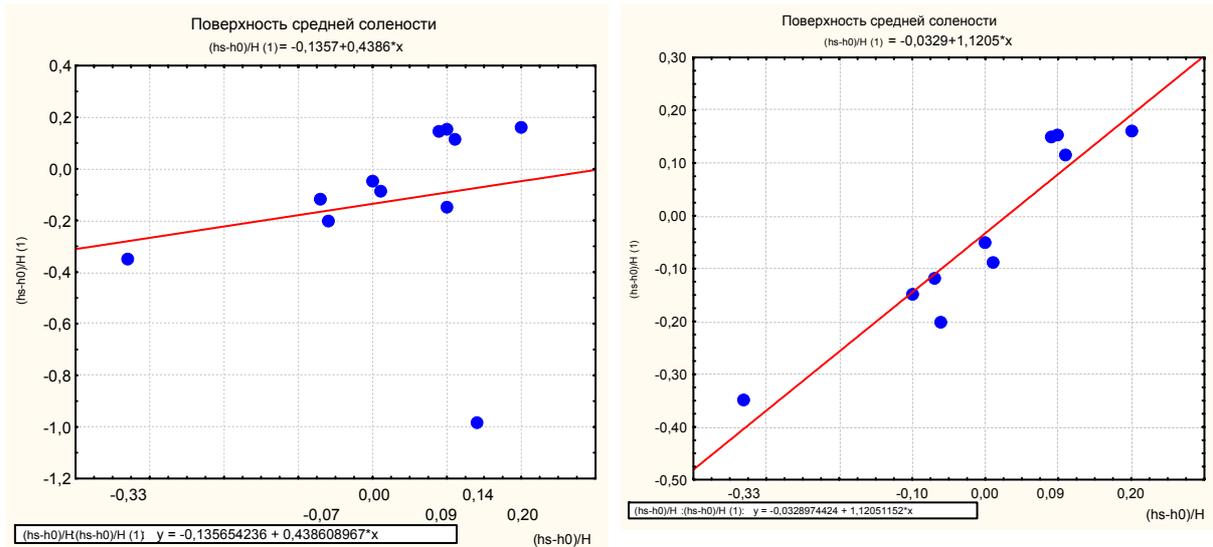


Рис. 3 - График связи наблюдаемого в Кинбурнском проливе безразмерного показателя $\frac{h_s - h_0}{H}$, вычисленного относительно скачка плотности, и определенного по формуле $\frac{h_s - h_0}{H} = \kappa \left(1 - \frac{V_p}{2V_M} \right)$ (при нахождении характеристик относительно поверхности нулевых скоростей)

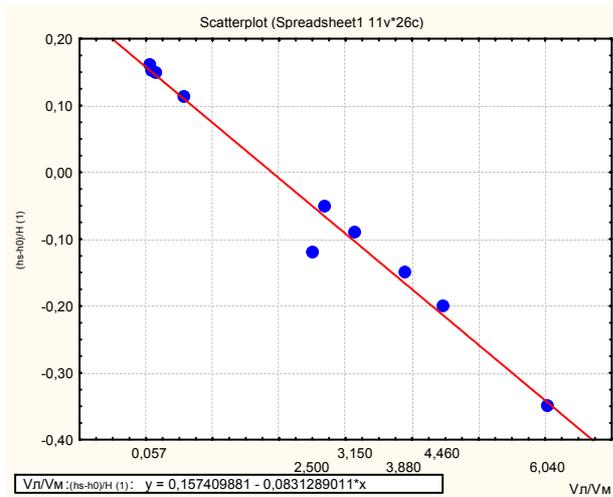


Рис. 4 - Зависимость в Кинбурнском проливе относительной разности характерных поверхностей (точек на вертикали $\frac{h_s - h_0}{H}$) от относительной величины средней скорости вытекающих лиманных вод $V_{л}$ и втекающих морских вод $V_{м}$

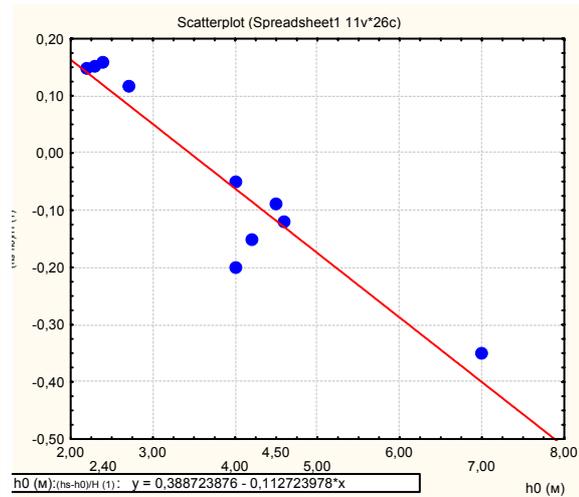


Рис. 5 - Зависимость относительной разности специфических поверхностей (точек на вертикали $\frac{h_s - h_0}{H}$) от заглубления поверхности нулевых скоростей h_0

Улучшение связей хорошо заметно и при дальнейшем анализе, когда бракованное значение при оценке связей исключалось. Изменение уровня в проливе определяется размером водообменных расходов, поэтому при исключении бракованного значения улучшились корреляции только некоторых зависимостей,

связанных с V_L и V_M , h_0 и $\frac{h_s - h_0}{H}$, см. табл.3

Уравнение связи между показателем, вычисленным по формуле (1) в зоне смешения и по тому же показателю, по данным наблюдаемым в Кинбурнском проливе, имеет вид

$$\left(\frac{h_s - h_0}{H}\right) \text{ зона смеш.} = 0.0329 + 1.12 \left(\frac{h_s - h_0}{H}\right) \text{ пролив} \quad (2)$$

Связь (2) проходит почти через нуль координатной сетки и под 45° . Это позволяет сделать заключение, что анализируемая безразмерная характеристика в зоне смешения и проливе (1), как *показатель неустановившегося взаимодействия* речной и морской водных масс между собой идентичны.

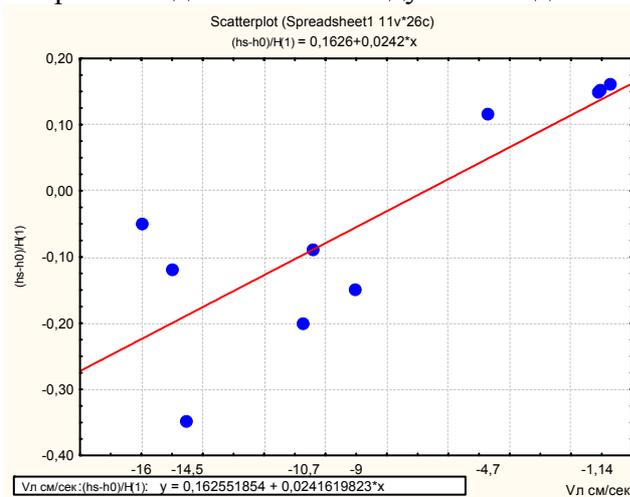


Рис.6 - Зависимость в Кинбурнском проливе относительной разности характерных поверхностей (точек на вертикали h_0 и h_s) от средней скорости вытекающих лиманных вод V_L

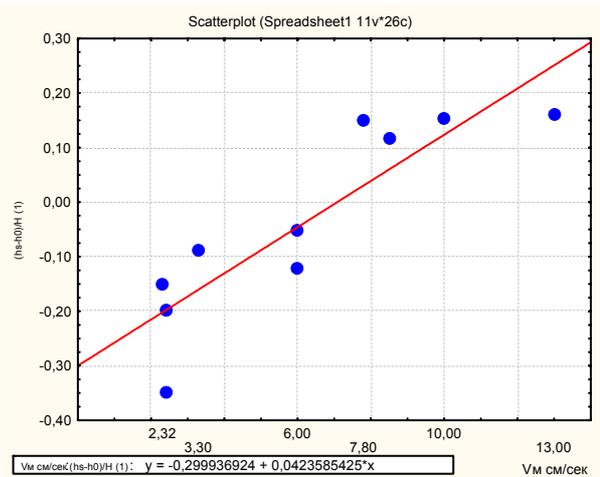


Рис.7 - Зависимость в Кинбурнском проливе относительной разности характерных поверхностей (точек на вертикали h_0 и h_s) от средней скорости поступающих в лиман морских вод V_M

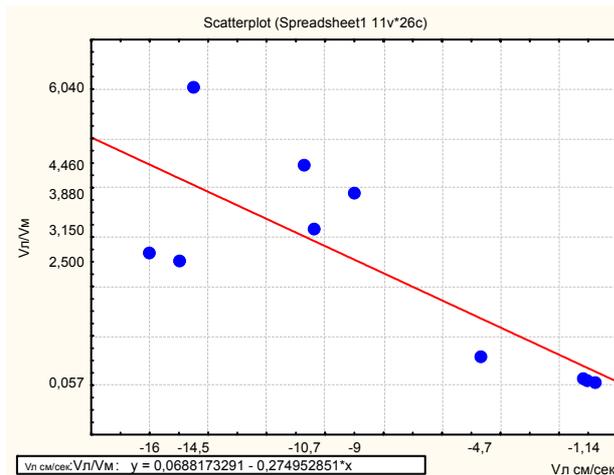


Рис. 8 - Зависимость в Кинбурнском проливе отношения средней скорости лиманного потока через пролив к средней скорости морского, от средней скорости вытекающих лиманных вод V_L

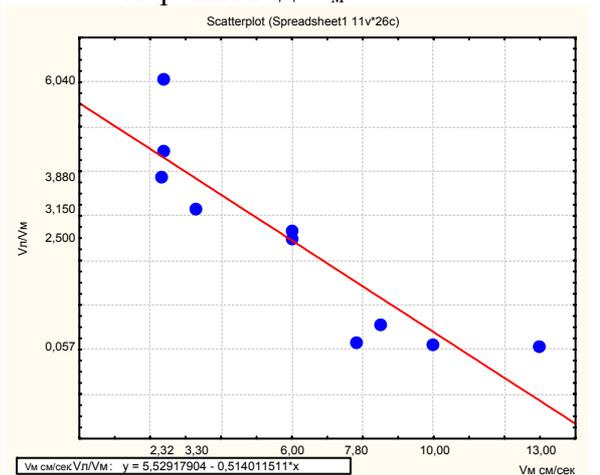


Рис. 9 - Зависимость в Кинбурнском проливе отношения средней скорости лиманного потока через пролив к средней скорости морского, от средней скорости втекающих морских вод V_M

Зависимость (1) можно признать общей, универсальной характеристикой для оценки взаимодействия между собой в проливе и зоне смешения лимана морских и речных водных масс.

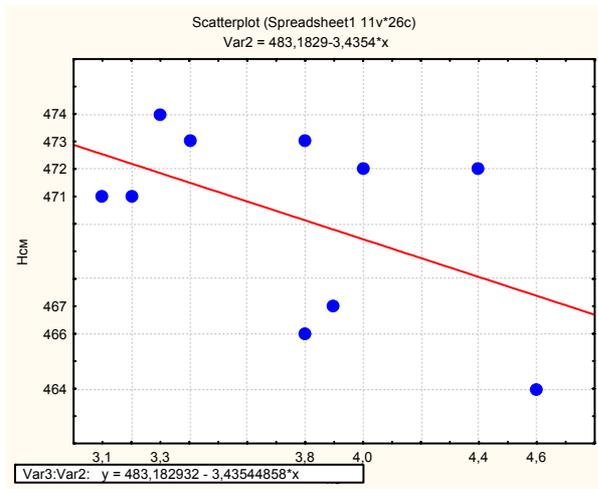


Рис.10 - Связь высоты уровня H и заглубления галоклина (средней солености на вертикали h_s) в Кинбурнском проливе.

На рис.10 поле точек разделяется линией на уровни, определяемые водностью Днепра: точки расположенные выше прямой соответствуют концу половодья, июль 1971 г; ниже прямой – осенним меженным расходам в сентябре 1971 г.

Анализ зависимостей свидетельствует о том, что при увеличении скорости вытекающей лиманной воды $-V_d$ граница раздела скачка плотности h_s понижается. Уменьшается толщина нижнего слоя h_s , т.е. увеличивается его заглубление от поверхности, вплоть до дна, когда двухслойный обмен превращается в дискретный.

Граница скачка плотности между лиманной и морской водными массами h_s/H на вертикалях, зоны смешения *распространяющейся на дельтовые русла*, определяется формулой (3) и зависит от плотностного числа Фруда Fr

$$\frac{h_s}{H} = Fr; \quad Fr = \frac{V_p}{\sqrt{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)gH}}, \quad (3)$$

где V_p - средняя скорость речной воды, ρ - средняя плотность по вертикали, $\Delta\rho$ - разность средних плотностей нижнего и верхнего слоев разноплотностных жидкостей зоны смешения. Плотностное число Фруда характеризует в общем случае относительное влияние гравитационных и инерционных сил, применяется в основном при лабораторных экспериментах. В данном случае также как и ранее предполагается, что поверхность средней солености на каждой вертикали и максимального градиента плотности в стратифицированной толще воды, совпадает.

Интересен факт неизменности коэффициента

$$\frac{U_s}{V_p} = \text{const} = 0.63, \quad (4)$$

где U_s - скорость на поверхности раздела, V_p - средняя скорость движения речной

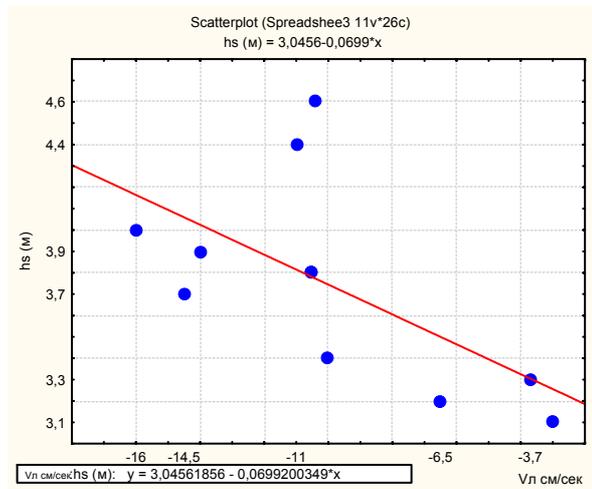


Рис.11 - Зависимость положения линии раздела водных масс h_s в поле скоростей от средней скорости V_d , вычисленных относительно линии нулевых скоростей.

воды поверх морской водной массы. Это свойство позволяет при заданном общем изменении скорости по глубине в распресненном слое (логарифмический закон, параболический др.), вычислить конкретную эпюру скоростей по известным h_0 , $U_s = 0.63V_p$ и V_p .

Стоковые течения (лиманные) в Кинбурнском проливе, при сгонных процессах в море и лимане, достигают максимальной скорости 100-300 см/с. При выходе в море эти воды образуют речную струю. Ядро речной струи переходит в инерционное течение на расстоянии 2-9 км от пролива, далее в стоково-ветровое и шлейф, [2,3]. Шлейф речной струи двигаясь вдоль генерального направления берега, является зоной трансформации речных вод в морские и достигает о.Змеиный на взморье Дуная. В этой зоне (зоне трансформации) скорости всегда меньше 10 см/с, [3].

Течения в проливе, как выяснено, имеют реверсивный характер и выполняют функцию дискретного и непрерывного двухслойного обмена, иногда трехслойного, который наблюдается при наличии свала глубин перед проливом со стороны лимана. Основную роль и значение играет двухслойный обмен. По объему переносимых масс воды через пролив и механизму взаимодействия разноплотностных вод, дискретный обмен является частью двухслойного. Значение трехслойного еще меньше – имеет смысл мертвого пространства при водо- и солеобмене через пролив.

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции характеристик водо- и солеобмена, вычисленные относительно поверхности нулевой скорости по вертикали

	H	h_s	h_0	$\frac{h_s - h_0}{H}$	V_l	V_m	V_l/V_m
$Cl_l, \text{‰}$	-0,0654	-0,638	0,438	-0,654	0,322	-0,687	-0,387
$Cl_m, \text{‰}$	0,208	-0,397	0,512	-0,645	-0,294	-0,586	0,472

Солеобмен через пролив оценивался по измеряемой хлорности на всех гидрологических вертикалях. Известно, что хлорный коэффициент для морских вод величина всегда постоянная, поэтому такая замена возможна. Коэффициенты линейной корреляции между гидравлическими характеристиками и соленостями (хлорностями $Cl_l, \text{‰}$), вытекающих из лимана в море лиманных вод и, поступающих в него через пролив, морских вод показаны в табл.4 и табл.5.

Таблица 5 - Коэффициент корреляции характеристик водо- и солеобмена вычисленные относительно поверхности скачка плотности (солености) по вертикали

	H	h_s	h_0	$\frac{h_s - h_0}{H}$	V_l	V_m	V_l/V_m
$Cl_l, \text{‰}$	-0,020	-0,590	0,439	-0,237	0,497	-0,047	-0,351
$Cl_m, \text{‰}$	0,584	-0,130	0,126	-0,170	-0,277	-0,033	0,180

При оценке корреляций нужно учитывать тот факт, что на поверхности скачка плотности, при частично перемешанной зоне смешения и галоклине (как типе зоны смешения), на границе раздела водных масс с различной плотностью фрикционные напряжения усиливаются и всегда образуются внутренние волны. Внутренние волны на поверхности скачка плотности существуют всегда, и естественно, создают статистический шум при отыскании гидравлических связей. Это лучше заметно при расчете характеристик относительно поверхности скачка плотности (солености) по вертикали. Поэтому, неточность определения гидравлических (гидрологических)

характеристик может быть связана, в том числе и с этим явлением. Результаты усреднений при наличии внутренних волн неточные. Период колебаний внутренних волн, не кратный суточному интервалу, может ухудшить результаты усреднений, Ожидаемый период внутренних волн не больше 3-4 часов, поэтому усреднение возможно из 6-8 измерений. Классической статистикой рекомендуется усреднять из 10 значений и больше, но допускается и из 4-х.

Полученные связи относятся к разряду слабых, рис.12-15. Несколько лучше обстоит дело, если характеристики рассчитываются по измерениям в проливе относительно поверхности с нулевой скоростью по вертикали, см. табл. 2, 3. Это касается также и зависимостей, приведенных на рис. 3-11.

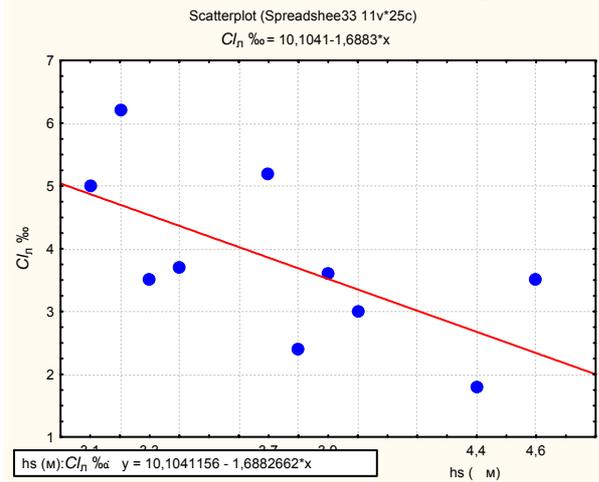


Рис.12 - Зависимость солености (хлорности) лиманной воды от заглубления скачка плотности (средней солености лиманной воды на каждой вертикали зоны смешения), вычисленной относительно нулевой поверхности

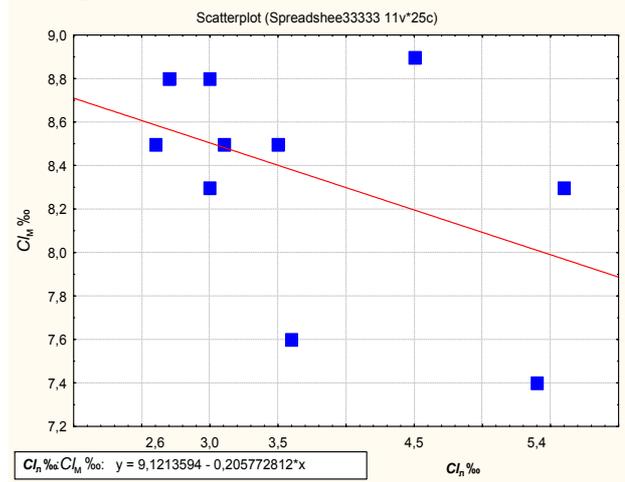


Рис.13 – График связи солености морских (Cl_M , ‰) и лиманных вод (Cl_L , ‰). График показывает, что связь между соленостью (хлорностью) морских и лиманных вод практически отсутствует.

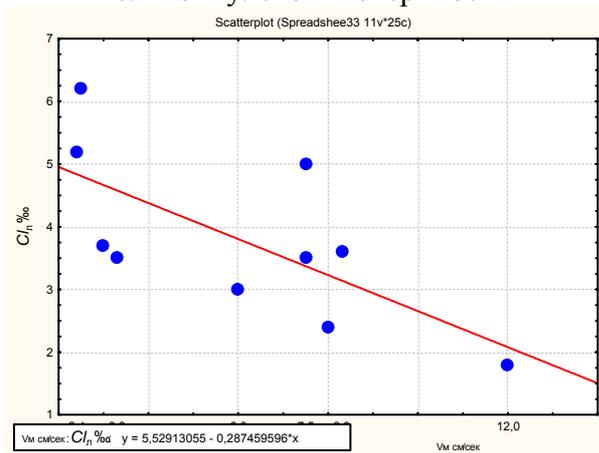


Рис.14 - Зависимость солености (хлорности) лиманной воды от средней скорости поступления в лиман морской воды, вычисленной относительно линии нулевой скорости

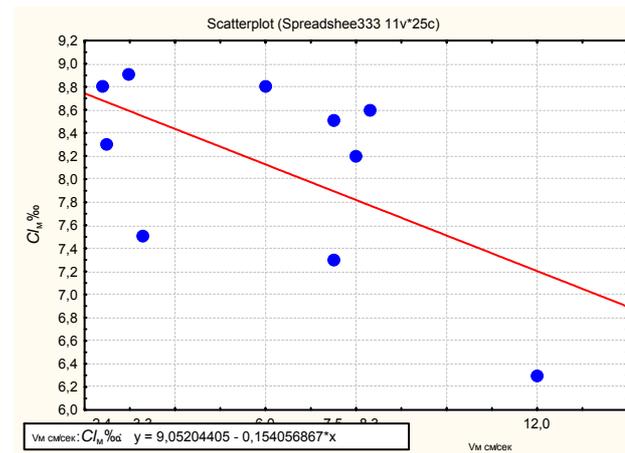


Рис.15 - Зависимость солености (хлорности) лиманной воды от средней скорости поступления в лиман морской воды, вычисленной относительно линии скачка плотности (средней солености)

Корреляция солености (хлорности) между морской и лиманной водными массами плохая, также как между h_S и h_0 . При их разделении поверхностью нулевых

скоростей корреляция равна $-0,33$, при разделении поверхностью скачка плотности $-0,45$. Это говорит о том, что поверхности нулевых скоростей и скачка плотности формируются не одновременно, отражают совершенно разные механизмы касающиеся водо- и солеобмена в проливе и зоне смешения. Кроме того, в данном случае, корреляция обусловлена интенсивностью процессов обмена массой между морской и речной водой, формирующих лиманную водную массу. Зависимость между ними обратная. Объяснение этому, вероятно, можно дать такое: на перемещение плотной частицы воды из нижних слоев в верхние легкие, при неизменной турбулентности, затраты энергии на преодоление силы тяжести не остаются неизменными. С увеличением солености (плотности) морской воды они больше, а при уменьшении плотности затраты энергии меньше. Измеряемые в проливе величины характеризуют отдельные состояния процесса, их можно рассматривать как близкие к стационарным условиям. Возрастание и уменьшение затрат энергии на преодоление силы тяжести, при перемещении частиц воды из нижних слоев в верхние, в таком случае не может четко просматриваться, является отображением неустановившихся условий и проявляется в ухудшении корреляций, разбросе точек на графиках.

Расчет установившегося водо- и солеобмена. Для расчета установившегося водообмена между лиманом и морем можно использовать теоретическую формулу, характеризующую стационарный процесс водо- и солеобмена через произвольный пролив

$$Q_m = \left(\frac{S_l}{S_m - S_l} \right) Q_p \quad (5)$$

Выбирая расчетный интервал, достаточный для стабилизации зоны смешения, тем самым получаем стабильные отношения в проливе между речным стоком Q_p , морским Q_m и лиманным Q_l

$$Q_p + Q_m = Q_l \quad (6)$$

а также между соответствующими соленостями S_l и S_m , измеряемыми в том же проливе. Проверим справедливость теоретической формулы (5) данными, известными из литературных источников, табл.6.

Приток *морских вод* через Кинбурнский пролив, вычисленных по (5), и рассчитанных Копайгородским Е. М., показывает формула (7)

$$Q_{m,(5)} = 0.558 + 0.386 Q_m(K) \quad (7)$$

Корреляция 0.76 между $Q_{m,(5)}$ и $Q_m(K)$ только кажется хорошей. В данном случае сравнивается одна и та же гидрологическая характеристика: приток морских вод в лиман через Кинбурнский пролив, вычисленный двумя различными способами, рис.16. Для одной и той же характеристики, прямая связи на рисунке должна проходить под углом 45° . В этом случае для аргумента Q_m угловой коэффициент должен быть 1.0 , а не 0.386 . Этому факту необходимо разъяснение. Дело в том, что коэффициент корреляции не всегда является исчерпывающей характеристикой генетической связи между процессами, всегда обязательно обоснование связи, например, теоретическое подтверждение в виде (5).

Таблица 6 - Водообмен через Кинбурнский пролив рассчитанный Копайгородским Е. М.^{*)} (1955) и, отдельно, Слатинским Ю.Г.^{**)} (1962), а также вычисленный по (1)

Месяцы	Q_p , км ³	S_L , ‰	S_M , ‰	Q_M , км ³ [*)]	Q_L , км ³	$S_M - S_L$, ‰	Вычисл. по (1) Q_M , км ³	$Q_p + Q_M$	Q_M , км ³ [**]	Q_L , км ³ [**]
Январь	2,23	2,2	9,9	0,45	2,69	7,7	0,64	2,68	4,5	6,6
Февраль	2,69	1,7	9,9	0,38	3,06	8,2	0,56	3,07	1,1	3,2
Март	5,64	1,3	9,9	0,69	6,3	8,6	0,85	6,33	3,2	7,5
Апрель	10,73	0,7	7,7	0,8	11,4	7,0	1,073	11,53	0,7	10,3
Май	13,86	0,5	6,6	1,12	14,88	6,1	1,14	14,98	0,5	14,0
Июнь	5,42	1,1	8,8	1,03	6,43	7,7	0,77	6,45	1,5	6,5
Июль	2,92	2,1	9,4	0,28	4,16	7,3	0,84	3,2	2,8	5,8
Август	2,59	3,1	9,9	1,63	4,21	6,8	1,18	4,22	4,1	6,8
Сентябрь	2,14	2,8	9,4	0,8	2,92	6,6	0,91	2,94	6,4	8,7
Октябрь	2,19	2,4	9,9	0,55	2,74	7,5	0,70	2,74	6,9	9,1
Ноябрь	2,47	2,5	9,4	0,94	3,39	6,9	0,89	3,41	7,2	9,0
Декабрь	2,32	2,7	9,9	0,98	3,34	7,2	0,87	3,30	7,6	9,9

Корреляция 0,678

Оценка оттока лиманных вод через пролив, вычисленная Копайгородским и, взятая как сумма притока в лиман речных и морских вод (балансовое условие неразрывности стационарного процесса), тоже дает удовлетворительную для естественных условий корреляцию 0.61.

Отток этих вод через Кинбурнский пролив, вычисляемый разными способами, связан между собой зависимостью

$$Q_L(Q_p + Q_M) = 0.698 + 0.0304Q(K). \quad (8)$$

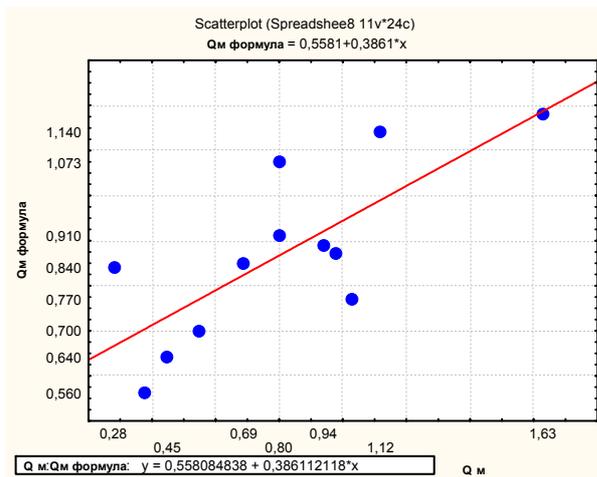


Рис.16 - График связи притока морских вод через Кинбурнский пролив, рассчитанного Копайгородским Е. М., $Q(K)$, и вычисленного по формуле (1), $Q_L(Q_p + Q_M)$

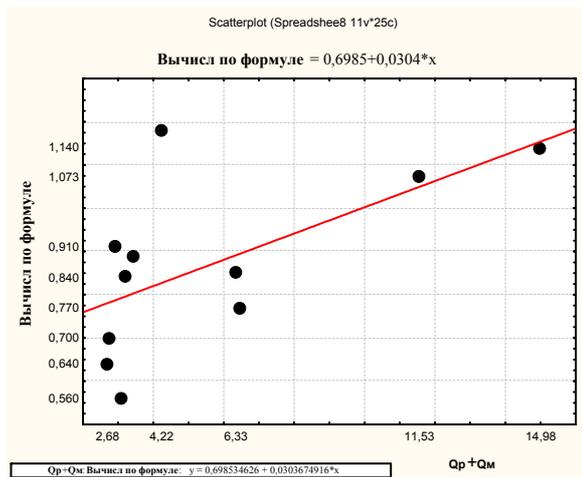


Рис.17 - График связи лиманного потока через Кинбурнский пролив, рассчитанного Копайгородским Е. М. и определенного для стационарных условий $Q_L = (Q_p + Q_M)$

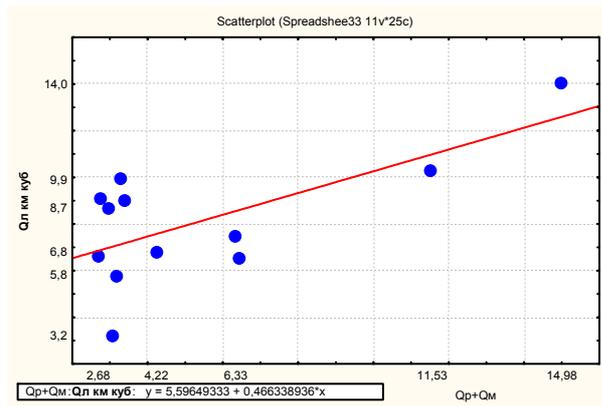


Рис.18 - График связи лиманного потока через Кинбурнский пролив, рассчитанного Слатинским Ю.Г. и определенного для стационарных условий $Q_l = (Q_p + Q_m)$.

Данные о притоке морских вод в Днепровский лиман, вычисленные Копайгородским и позднее Слатинским, табл.11, не коррелируют между собой вообще, корреляция практически отсутствует (0.048). В то же время отток лиманных вод через пролив, вычисленный теми же авторами, имеет корреляцию 0,68. Уравнение этой зависимости имеет вид

$$Q_m = 5.596 + 0.466 Q_m (к) \quad (9)$$

Комментарий к (9) аналогичен анализу формулы (7), его не будем повторять.

Приток морских вод через Кинбурнский пролив и отток лиманных вод, оцененный в прежние времена, иллюстрируется графиками связи на рис. 16-18.

Представленные зависимости относятся к слабым и хорошим. Поэтому, несмотря на встречающуюся хорошую корреляцию, в итоге получаем такие выводы:

- во-первых, о неудовлетворительной оценке водообмена через Кинбурнский пролив, выполненные Копайгородским Е.М и Слатинским Ю.Г.;
- во-вторых, аналитическая формула (5) правильно отображает механизм стационарного водо- и солеобмена для любого двухмерного пролива, и может быть использована также как диагностическая для оценки правильности измерений в натуральных условиях, вычисленные другим способом.

Во втором и в третьем случаях, рис.16,17 причину плохой корреляции следует искать в некачественных определениях балансовых составляющих, положенных в основу расчета в прошлые времена Копайгородским Е. М. и Слатинским Ю.Г.

Расчет неустановившегося водо- и солеобмена. Для расчета неустановившегося водо- и солеобмена через Кинбурнский пролив, используются графики, показанные на рис. 2-11, установленные в ходе анализа механизмов водо- и солеобменных процессов через пролив. Порядок расчета реверсивного двухслойного и дискретного неустановившегося водо- и солеобмена через пролив, находится по измеряемой в натуре характеристике h_0 , меняющейся во времени, и тем отражающая неустановившийся режим.

Остальное определяется следующей последовательностью действий.

1. По h_0 устанавливается относительная разность $\frac{h_s - h_0}{H}$, рис.3. Для чего используется зависимость (5), при $\kappa=0.16$ для Кинбурнского пролива или (10)

$$\frac{h_s - h_0}{H} = 0.390 - 0.113 h_0 \quad (10)$$

2. Отношение средней скорости V_m морского к скорости V_l лиманного потока, вычисленного относительно скачка плотности (или средней солености), определяется по рис.4 или по формуле

$$\frac{h_s - h_0}{H} = 0.157 - 0.083(V_n/V_m), \quad (11)$$

3. Для определения солеобмена нужно найти местоположение на разрезе Кинбурнского пролива h_s , рис.10,11. Границу раздела между лиманной (осолоненной речной) и морской водными массами, из-за слабой корреляции (0.51), рекомендуется вычислять по формуле (12) по известным h_0 и (V_n/V_m) .

$$h_s = h_0 + H(0.1088 - 0.5929(V_n/V_m)). \quad (12)$$

Коэффициенты корреляции между этими характеристиками в неустановившихся условиях достаточно хорошие, превышают -0.72.

4. Для определения солеобмена и обменных расходов воды через пролив, кроме глубины h_s и h_0 , необходимо знать также площади поперечного сечения пролива, в зависимости от высоты уровня, т.е. площади водного сечения пролива в зависимости от уровня. Далее, вычисляются расходы лиманных и морских вод по обычной формуле расхода, как произведения скорости на площадь. Площади занятые соответствующими водными массами известны, поскольку известно h_s .

5. Зависимость солёности вытекающих лиманных вод от объемов речного стока находится по теоретической балансовой формуле (5), по известной солёности поступающих в лиман морских вод и вытекающих лиманных. Всегда желательно проверять вычисленные по речному стоку солёности лиманных и морских вод, путем расчета каким-либо другим способом.

Выводы. Анализ функциональной роли и значения водо- и солеобменных процессов в проливе показал, что наибольшее значение играет двухслойный обмен, дискретный является составной его частью и проявляется как максимальные и минимальные составляющие неустановившихся процесса обмена. Трехслойный обмен, предположительно, представляет мертвое пространство в проливе, при расчете водо- и солеобмена между лиманом и морем и поэтому может не учитываться.

Для оценки водо- и солеобмена через пролив использованы новые подходы. Выяснено, что водо- и солеобмен между лиманом и морем характеризуется взаимным положением в проливе и во всей зоне смешения специфических поверхностей, позволяющих раскрыть механизм взаимодействия между морской и лиманной водными массами. Изменчивость обменных процессов в проливе оценивалась, во-первых, описанием изменчивости *поверхности нулевых скоростей*, разделяющих по динамике двухслойную толщу зоны смешения, во-вторых, динамика солей в зоне смешения рассматривалась с помощью другой специфической характеристики обмена - изменчивости *галоклина (поверхности скачка плотности)*, разделяющих водные массы по средней солёности. Скачек плотности, в толще зоны смешения и проливе, при изучении обменных процессов, заменили изучением во времени положения скачка солёности (галоклина на каждой вертикали).

Взаимное положение специфических поверхностей определяет водо- и солеобмен между лиманами морем, проясняет переход от установившихся условий обмена к неустановившимся. Этот переход *обеспечивается быстрой перестройкой поля скоростей*.

Взаимозависимость гидравлических характеристик в динамической двухслойной толще оценивалась коэффициентами линейной корреляции и графиками связи, в первую очередь *относительно галоклина* на каждой вертикали разреза в проливе.

Водо- и солеобмен между морем и лиманом имеет колебательный характер.

Возвратно-поступательный обмен через пролив лучше заметен по среднесуточным значениям течений, вычисленным *относительно поверхности нулевых скоростей*.

Найден безразмерный *показатель неустановившегося взаимодействия* речной и морской водных масс в зоне смешения и в проливе, его можно считать универсальным показателем. Перемещение поверхности нулевых скоростей по вертикали приводит в дальнейшем к перемещению по вертикали галоклина, в котором находится значение средней солености на вертикали. Перестройка поля скоростей приводит к фазе неустановившегося водообмена и в последующем запускает неустановившийся солеобмен. Солеобмен - процесс более инерционный, по сравнению с водообменом, поэтому динамика лиманной водной массы активнее морской. Это проявляется в большей подвижности ее вод, колебательных движениях в верхней, лиманной, части толщи зоны смешения.

Анализ изменчивости относительной разности характерных поверхностей позволил установить, что непостоянство поверхности нулевых скоростей и их относительной разности, приводят в действие совершенно разные механизмы водо- и солеобмена в проливе. Обуславливает интенсификацию процесса обмена массой между морской и речной водой, формирует в зоне смешения водную массу лиманную. Дано объяснение этим фактам и выявлены возможные последствия их действия. В результате исследования рекомендован расчет установившегося водо- и солеобмена в двухслойном двухмерном проливе и, впервые, неустановившегося, оцениваемого по специфическим характеристикам изменяющимся во времени.

Литература

1. Кейлеган Д. Г. Механизм образования неподвижного клина соленой воды. // В сб. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Под ред. А.Т.Иппена. -Л.: Гидрометеиздат, 1970. -394 с.
2. Илюшин В.Я., А.В. Пушкарь, А.В. Ставерская. Изменение структуры речной струи на взморье при изменении глубины и интенсивности присоединения к ней морской воды // Український гідрометеорологічний журнал. -2008. - №3.- С. 221-228.
3. Илюшин В.Я. Частное решение уравнения Сен-Веннана для участка потока с нулевым уклоном водной поверхности //Український гідрометеорологічний журнал. -2009. Вып.5. – С. 219--230.

Роль і значення водо- і солеобміну через протоку у водному і сольовому балансі зони змішення лиману.

В.Я.Ілюшин

Роль і значення водо- і солеобмінних процесів в протоці своєрідні. Головна роль належить двошаровому обміну, дискретний обмін може розглядатися як безперервний двошаровий. Запропоновано оригінальний спосіб оцінки і розрахунку водо- і солеобміну для стаціонарних і несталих умов.

Ключові слова: водні маси, кореляція, гідродинаміка, поверхня нульових швидкостей, галоклін, методи розрахунку.

The role and importance of the water and salt exchange through a strait in the water and salt balance of the estuary mixing area

V.Ya.Iliushin

The role and importance of water and salt cycle processes in a strait is specific. The main role belongs to the two-layer exchange. A discrete exchange can be considered as a continuous two-layer one. The original method of estimation and calculation of water- and salt exchange for stable and unstable conditions is proposed.

Keywords: water masses, correlation, hydrodynamics, zero speed surface, halocline, calculation methods.