

УДК 556.5

**В.Я. Илюшин**, к.г.н.

*Одесский государственный экологический университет*

## **МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ ЛИМАНА И ВЛИЯНИЕ НА НЕЁ РЕВЕРСИВНОГО ВОДООБМЕНА ЧЕРЕЗ ПРОЛИВ**

*Рассмотрен механизм формирования зоны смешения. Установлено, что в натуральных условиях гидромеханический подход непродуктивен. Гидрологический метод изучения реальных зон смешения речных и морских вод устьевых взморий в настоящее время предпочтительнее. Высказанные гипотезы о водообмене, включая нетрадиционные, подтверждены анализом связей между гидравлическими характеристиками в Кинбурнском проливе.*

**Ключевые слова:** морская и лиманная водные массы, корреляция, поверхность нулевых скоростей, галоклин.

**Постановка проблемы.** Формирование зоны смешения лимана определяется, прежде всего, притоком речных и морских вод, и оттоком лиманных вод через пролив. Хорошо известно, что пресные речные воды по своим физическим и химическим свойствам значительно отличаются от морских. В результате их смешения в лимане формируется лиманная водная масса, источники которой пространственно расположены с разных сторон зоны смешения в устьевой области, морской (океанической) и речной (континентальной). При закрытом устьевом взморье взаимодействие речной и морской водных масс, формирующих зону смешения, в значительной степени определяется реверсивным водообменом через пролив, спецификой динамики толщи вод зоны смешения и особенностями механизма взаимодействия речных и подстилающих их более плотных морских вод в этой зоне.

Зона смешения речных и морских вод в лимане в общем географическом понимании является зоной геоэкологического барьера между континентальными и океаническими водными массами. Поэтому изучение процесса формирования этой зоны имеет значение в первую очередь для водного населения этой зоны и касается оценки экологических свойств водного объекта.

**Состояние исследований** Специфика механизма взаимодействия речных и морских вод в зоне смешения определяется рядом гидромеханических, гидравлических и гидрологических процессов, как следствие притока речных вод, морских через пролив и оттока лиманных, различных типов ее стратификации:

- устойчивостью слоев зоны смешения к перемешиванию по вертикали;
- сдвиговыми напряжениями на поверхности раздела между речными и морскими водами, жидкой средой и дном, между слоями в толще воды. В условиях, когда речная вода движется по поверхности морской, фронтальная зона раздела речных и морских водных масс может быть в виде скачка плотности (при динамическом галоклине), в других случаях зоной вод, частично или полностью перемешанных по вертикали;
- общим гидродинамическим состоянием зоны смешения, определяемым физическими свойствами взаимодействующих водных масс и гидрологическими факторами, обуславливающими эти взаимодействия.

Структура зоны смешения определяется, прежде всего, устойчивостью слоев. Стратификацию в зоне смешения можно оценить по данным обычных гидрологических наблюдений, по кинематической формуле Хессельберга-Свердрупа,

$$E = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta \rho}{\Delta z} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \left( \frac{dt}{dz} - \frac{d\vartheta}{dz} \right) + \frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{dS}{dz}, \quad (1)$$

где  $E$  - общая устойчивость слоев. Правая часть формулы представлена суммой температурной и соленосной устойчивости:  $\Delta \rho / \Delta z$  - градиент плотности воды по вертикали, без учета потенциальной температуры;  $(\partial \rho / \partial t) dt$  - изменение плотности воды в вертикальном направлении в зависимости от градиента температуры;  $dt/dz$  - приращение температуры в вертикальном направлении;  $d\vartheta/dz$  - изменение потенциальной температуры по глубине;  $(\partial \rho / \partial S) dS$  - изменение солености воды по вертикали, определяемое приращением солености.

Механизм разрушения поверхности раздела при переходном состоянии водной толщи в зоне смешения от динамического галоклина к частично или полностью перемешанной зоне, в теоретической гидромеханике и в лабораторных опытах определяется следующими безразмерными комплексами:

1) локальным числом Ричардсона

$$Ri = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left/ \left( \frac{dV}{dn} \right)^2 \right., \quad (2)$$

где  $g$  - ускорение силы тяжести;  $\frac{\partial \rho}{\partial z}$  - градиент плотности воды в вертикальном направлении;  $\frac{dV}{dn}$  - градиент скорости по нормали к скачку плотности;

2) локальным динамическим числом Ричардсона  $R_f$

$$R_f = \frac{\frac{g}{s} \overline{u'_3 s'}}{u'_1 u'_3 \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_3}}, \quad (3)$$

где  $g$  - ускорение силы тяжести,  $s$  - субстанция (соленость),  $u'_3$  - изменчивость пульсационной скорости по оси нормальной к наибольшему градиенту плотности,  $s'$  - пульсация субстанции,  $u'_1$  - изменчивость пульсационной скорости по оси нормальной к наибольшему градиенту плотности;  $\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_3}$  - градиент усредненной скорости по оси нормальной к наибольшему градиенту плотности;

3) локальным числом Рейнольдса, впервые введенным Л.Г. Лойцяным,

$$Re_\delta = \frac{\Delta V \delta_n}{\frac{\rho_1 \nu_1 + \rho_0 \nu_0}{\rho_1 + \rho_0}}, \quad (4)$$

где  $\nu_1, \nu_0$  - кинематические коэффициенты разноплотностных жидкостей.

4) общеизвестным для всей толщи зоны смешения турбулентным числом Рейнольдса.

На основе линейной теории малых возмущений в теоретической гидромеханике показано, что условие роста во времени малых возмущений в слое раздела (в слое максимальных градиентов плотности по вертикали), может быть представлено зависимостью

$$F = Re_\delta * (Fr_\delta)^2, \quad (5)$$

где  $\delta$  - толщина слоя малых возмущений в области пограничного слоя динамического галоклина. Это состояние отображается локальными безразмерными числами

Рейнольдса (4) и Фруда  $Fr_\delta$  (6),

$$F = \frac{(\Delta V)^2}{g \frac{\Delta \rho}{\rho} \delta_{\text{д}}} * (\text{Re}_\delta), \quad (6)$$

Где ламинарное течение в слое раздела существует при  $\text{Re}_\delta * (Fr_\delta)^2 = F \leq F_{\text{кр}} \approx 150$ , а турбулентное перемешивание наблюдается при  $\text{Re}_\delta * (Fr_\delta)^2 = F \leq F_{\text{кр}} \geq 1650$ .

Промежуточные значения характеризуются числами:

- движение с регулярными устойчивыми внутренними волнами (500);
- движение с преобладанием нерегулярных длинных волн (800);
- с преобладанием коротких неустойчивых волн (1650).

В натуральных условиях гидромеханику формирования зоны смешения проследить весьма сложно из-за кратковременности отдельных ее состояний, мелкомасштабной по времени динамики в зоне смешения. Гидрологический и гидравлический методы изучения реальных зон смешения в настоящее время, вероятно, оказываются предпочтительнее методов теоретической гидромеханики (истинно и то, что без ее результатов невозможен качественный анализ процессов, происходящих в зоне смешения).

Гидрологические и гидравлические факторы, обуславливающие взаимодействие морских и речных вод в зоне смешения и водообменных процессов в проливе, изучены недостаточно. Предполагаем, что эти факторы проявляются через следующие процессы и состояния зоны смешения, обуславливающие ее гидродинамику в естественных условиях:

- степень устойчивости процессов взаимодействия речных и морских водных масс в зоне смешения, особенностями источников их формирования, физических и химических свойств водных масс, особенностями динамики зоны смешения;
- возвратно-поступательным водообменом (дискретным, непрерывным двухслойным или трехслойным) через пролив, который соединяет лиман и море, и внутригодовым режимом речного стока;
- объемами поступающих в зону смешения морских и речных вод;
- механизмом обмена физико-химическими свойствами в толще зоны смешения, кинетикой химических реакций, отражающих разную скорость изменения свойств во времени взаимодействующих водных масс;
- общим гидродинамическим состоянием элементов системы “атмосфера-гидросфера-литосфера”.

**Водообмен через пролив и его влияние на механизм формирования зоны смешения.** Определение величин водо- и солеобмена через пролив возможно путем совместного решения уравнений водного и солевого балансов. Для больших промежутков времени (год, многолетние величины) таким способом находится установившийся характер обмена. Для оценки неустановившегося его характера нужно использовать балансовые уравнения в дифференциальной форме. Водо- и солеобмен можно также характеризовать уравнениями гидродинамики. Надежнее всего, все-таки, водо- и солеобмен через живое сечение пролива можно оценить непосредственными измерениями. В естественных условиях выполнить это весьма непросто.

Определяя обмен через пролив из уравнений гидродинамики, исходят из предположения, что движение установившееся, двухслойное и плоское (двухмерное). Решение плоской задачи предполагает использование некоторого количества данных непосредственных измерений, характеризующих установившийся режим в реальных морфометрических условиях конкретного пролива. Численные

методы позволяют решать задачу и для трехмерных условий, характеризуя при этом состояние обмена, но не саму динамику в его развитии.

**Исходные данные.** Наиболее полные непосредственные измерения расходов воды и солей в северо-западной части Черного моря проводились в Кинбурнском проливе, когда инициировалось его перекрытие в связи с переброской дунайских вод для орошения аридной зоны юга Украины. Измерения скоростей течений и солености вод проводились экспедициями СО ГОИНа и Днепро-Бугской устьевой станцией в июле и сентябре 1971 г. Суточные гидрологические станции выполнялись тремя судами, одновременно в разных местах по ширине пролива.

Непосредственные измерения показали, что режим течений и солености вод в проливе оказался настолько сложным в пространстве и изменчивым во времени, что этих наблюдений для вычитывания водо- и солеобмена через пролив оказалось совершенно недостаточно. Динамичность процесса водообмена здесь чрезвычайно активная, изменчивая и во времени и в пространстве, вследствие чего водо- и солеобмен невозможно привести к единому моменту времени и створу в проливе, без чего, понятно, оценка его балансовых составляющих невозможна.

**Метод исследования.** Используя эти данные, определим вероятную обусловленность отдельных свойств водообмена, путем усреднения измеренных значений характеристик на суточном промежутке времени, достаточном в отношении длительности измерений в точке и на отдельных вертикалях гидрологических станций. Особенности возвратно-поступательного обмена в проливе и зоне смешения будем устанавливать методом корреляции, привлекая для этих целей логически обоснованное влияние одних факторов на другие.

Для характеристики водообмена и солеобмена между лиманом и морем будем рассматривать изменчивость гидрологических характеристик в проливе и во всей зоне смешения в зависимости от взаимного положения двух специфических поверхностей, ответственных за водо- и солеобмен между морской водной массой и слабо осолоненной речной, не использующихся до сих пор в этих целях.

Первой такой характеристикой является поверхность скачка плотности в зоне смешения лимана и в проливе, совпадающей с поверхностью галоклина и *средней соленостью воды на каждой вертикали*. Динамика этой поверхности отражает изменение количества солей в зоне смешения, в лиманной (осолоненной речной) и морской водных массах. Подъем этой поверхности говорит о возрастании количества солей в зоне смешения, опускание – о том, что масса солей в зоне смешения уменьшается.

Количество солей в зоне необходимая, но недостаточная характеристика солености воды. Соленость воды в зоне смешения определяется также и объемом воды в ней.

Увеличение и уменьшение объема воды в зоне смешения характеризуется положением в толще воды поверхности раздела поля нулевых скоростей  $h_0$ , являющейся второй нетрадиционной характеристикой. При возрастании притока морской воды в лиман поверхность раздела поля скоростей на каждой гидрологической вертикали, предположительно, должна подниматься к поверхности, а при увеличении оттока лиманных вод эта поверхность опускается ко дну, увеличивается заглублиение  $h_0$ .

Всесторонняя проверка этих гипотез данными наблюдений в естественных условиях составляют **задачи исследования**.

**Результаты исследований.** В установившихся условиях режима стратифицированной зоны смешения поверхность раздела поля скоростей  $h_0$  всегда расположена ниже поверхности раздела скачка плотности (среднего значения

солёности  $h_s$ ), которая менее динамична, чем первая. Изучение в лабораторных условиях стационарного поведения клина солёной воды показало, что эта разность составляет относительную величину - 0,12, [1].

Исследование взаимного положения специфических поверхностей, принятых нами в качестве сигнальной системы водо- и солеобмена между лиманом и морем, объясняет особенности перехода от установившихся условий к неустановившимся. Становится понятным противоречивое на первый взгляд суждение о большей динамичности водного режима по сравнению с солевым, при хорошо выраженной синфазности на отдельных вертикалях зоны смешения речных и морских вод, и с некоторым сдвигом колебаний солёности по отношению к скорости в зоне смешения.

Переход от установившегося режима к неустановившемуся не только водного, но и солевого, обеспечивается быстрой перестройкой поля скоростей. Мобилизация выноса солёных вод из лимана, или поступления солей в зону смешения, осуществляется при этом перестройкой не поля солёности, а главным образом перемещением по вертикали в толще воды границы раздела поля скоростей  $h_0$ . Это ведёт к соответствующему изменению не только средней скорости в поперечном сечении пролива, но и площади водного сечения. Обменные расходы при этом возрастают или уменьшаются по нелинейному закону, определяемому произведением скорости  $V$  на площадь  $\omega$ ,  $Q=V\omega$ , обуславливая тем смену фаз засоления и рассоления в солевом балансе.

Резкое увеличение выноса солей достигается такой перестройкой поля скоростей, при котором граница раздела  $h_0$  поля скоростей опускается ниже положения границы, отвечающей 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 подъёме поверхности раздела поля скоростей относительно положения ее в установившихся условиях. В предельном случае, когда поверхность раздела скоростей, нулевого значения скорости, достигает открытой водной поверхности, тоже происходит замена непрерывного двухслойного обмена – однонаправленным, дискретным обменом вод через все сечение пролива.

Из анализа видно, что роль дискретного обмена является частным случаем общего случая – непрерывного двухслойного водообмена через пролив. Мерой проявления этого типа обмена во времени является момент достижения границей раздела нулевого значения скорости дна или открытой водной поверхности.

В первом случае водо- и солеобмен имеют знак минус в отношении всей лиманной зоны смешения, во втором – плюс.

Относительная разность между пересечением на каждой вертикали зоны смешения характерных поверхностей, определяется формулой, полученной автором статьи ранее для всей зоны смешения

$$\frac{h_s - h_0}{H} = \kappa \left( 1 - \frac{V_p}{2V_M} \right), \quad (7)$$

где  $h_s$  - заглубление на вертикали средней солёности,  $h_0$  - заглубление на вертикали нулевого значения скорости в зоне смешения,  $H$  - глубина,  $V_p$  - средняя скорость осолоненной речной воды (лиманной) на вертикали зоны смешения относительно точки  $h_0$ ,  $V_M$  - средняя скорость морской воды на вертикали зоны смешения относительно точки  $h_0$ ;  $\kappa$  - коэффициент формы русла. В данном случае предполагается, что поверхность средней солёности на каждой вертикали и максимального градиента плотности в толще воды зоны смешения совпадают. Это

справедливо для условий однородной температуры воды в зоне смешения или, в случае неоднородной температуры во всей толще, однородной, отдельно, в морской и речной водных массах, составляющих структуру зону смешения.

Гидрологические факторы, влияющие на процесс взаимодействия морских и речных вод в зоне смешения, будем проверять наблюдаемыми данными водо- и солеобменных характеристик в проливе, в июле и сентябре 1971г. Изменчивость усредненных гидрологических показателей будем рассматривать путем изучения их влияния на относительную разность специфических поверхностей. Таких как: изменчивость уровня на водпосту Очаков, средней скорости поступления в лиман морской воды, а также изменчивость отношения средних скоростей вытекающего в верхних слоях лиманного потока и поступающего в лиман морского в нижних слоях, через поперечное сечение Кинбурнского пролива. Сравнить будем характеристики, вычисленные *относительно поверхности нулевых скоростей в проливе* и вычисленные по формуле (7), табл. 1.

Таблица 1 - Усредненные по суточным интервалам времени характеристики водно-солевого обмена через Кинбурнский пролив, относительно поверхности нулевых скоростей

Дата	$H$ , см	$h_S$ , м	$h_0$ , м	$\frac{h_S - h_0}{H}$	$V_L$ , см/с	$V_M$ , см/с	$\frac{V_L}{V_M}$	$\frac{V_L}{2 V_M}$	$\frac{h_S - h_0}{H}$ по (1)
22.VII.1971г.	472	3,7	7,0	-0,33	-14,5	2,4	6,4	3,2	-0,35
23.VII.1971г.	474	3,3	2,3	0,10	-3,7	7,5	0,49	0,25	0,12
24.VII.1971г.	473	3,4	4,0	-0,06	-10,0	3,0	3,33	1,66	-0,11
25.VII.1971г.	472	4,4	2,4	0,20	-11,0	12,0	0,92	0,46	0,09
26.VII.1971г.	467	3,9	4,6	-0,07	-14,0	8,3	1,69	0,84	0,03
27.VII.1971г.	473	3,8	2,7	0,11	-10,5	8,0	1,31	0,66	0,05
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(3.2)	-0,14(0.06)	-10,5	3,0	0,44	0,22	0,12
15. IX. 1971г	471	3,1	2,2	0,09	-3,0	7,5	0,40	0,20	0,12
16. IX. 1971г	471	3,2	4,2	-0,10	-6,5	2,5	2,6	1,3	-0,05
18. IX. 1971г	464	4,6	4,5	0,01	-10,4	3,3	3,15	1,68	-0,11

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 линии нулевых скоростей, где  $H$  – средняя глубина на поперечном разрезе пролива,

$V_L$  – средняя скорость лиманной воды, вытекающей из лимана,

$V_M$  – средняя скорость поступления в лиман морской воды,

$V_L / V_M$  – скалярные величины отношения средних скоростей через гидрологический разрез в Кинбурнском проливе.

(Цифры в скобках за 14. IX. 1971г являются исправленными значениями, они в расчетах не использованы)

По данным табл. 1 вычислены коэффициенты линейной корреляции, с целью выявления значимости отдельных факторов взаимосвязей. Характеристики водо- и солеобмена через Кинбурнский пролив отражают реверсный режим обмена. Эти оценки представлены в виде матрицы коэффициентов линейных связей различных факторов, табл. 2.

Таблица 2 - Корреляционная матрица характеристик водо- и солеобмена через Кинбурнский пролив, вычисленных относительно линии нулевых скоростей на поперечном разрезе через пролив

	$H$	$h_S$	$h_0$	$\frac{h_S - h_0}{H}$	$V_L$	$V_M$	$V_L/V_M$
$H$	1	-0,507	-0,391	0,225	0,202	0,274	-0,043
$h_S$		1	0,163	0,164	-0,611	-0,225	-0,116
$h_0$			1	-0,947	-0,606	0,708	-0,764
$h_S - h_0$				1	-0,406	0,782	-0,726
$V_L$					1	0,078	-0,526
$V_M$						1	0,588
$V_L/V_M$							1

Примечание: обозначение см.таб.1

Подвергая анализу корреляционную таблицу, можно сделать вывод, что поле солёности зоны смешения весьма слабо реагирует на динамику поля скоростей, а возвратно-поступательный характер солевого обмена через пролив оказывает незначительное влияние на солёность вод зоны смешения. На характеристику поля солёности, отображенную через  $h_S$ , существенное влияние оказывает вынос лиманных вод и солей через пролив, см. вторую строку в табл. 2. Отток лиманных вод  $V_L$  имеет обратную связь с показателем поля солёности, коэффициент линейной корреляции между ними - 0.61. Влияние поступающих морских вод через пролив на положение поверхности скачка плотности  $h_S$  в зоне смешения незначительное, корреляция едва прослеживается, равна 0.26.

Записанные выше по тексту тезисы, относительно роли и значения поверхности нулевых скоростей, высказанные в качестве гипотез, подтверждаются анализом рис. 1,2,3.

Разность между поверхностью, объединяющей средние значения солёности на каждой вертикали  $h_S$ , и поверхностью нулевых скоростей  $h_0$ , на этих же вертикалях и разделяющих поле течений на противоположно направленные потоки, больше зависит от сильно изменчивого поля скоростей, а не от инерционного поля солёности. Коэффициент корреляции в этом случае равен -0.95, что указывает на обратную причинно-следственную и почти аналитическую зависимость этих характеристик, рис. 4а. В случае оценки влияния водо- и солеобмена через пролив, посредством использования взаимосвязи  $h_0$  и  $h_S$ , установлено, что эти процессы практически независимы, корреляция между ними практически отсутствует, 0.16, табл.2. Разница между этими величинами является величиной случайной. Это понятно, если учесть, что приток морских вод зависит от множества гидрофизических и динамических характеристик с морской стороны пролива, а со стороны лимана на скорость оттока лиманных вод влияет значительное количество других факторов (ход уровня, приток речных вод, волнение в лимане и на морской акватории и пр.)

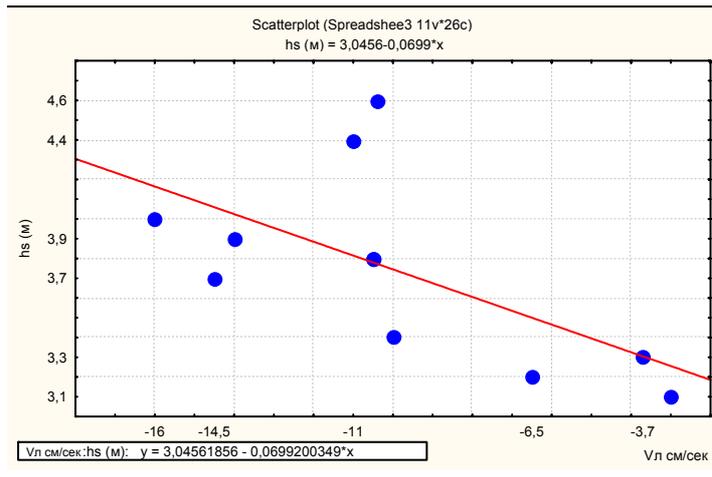


Рис.1 - Зависимость положения линии раздела водных масс  $h_s$  в поле скоростей от средней скорости  $V_{л}$  выноса из зоны смешения лимана осолоненных речных вод

Анализ зависимости показывает, что при увеличении скорости вытекающей лиманной воды  $-V_{л}$  граница раздела скачка плотности  $h_s$  понижается (уменьшается толщина слоя  $h_s$ , увеличивается ее заглубление).

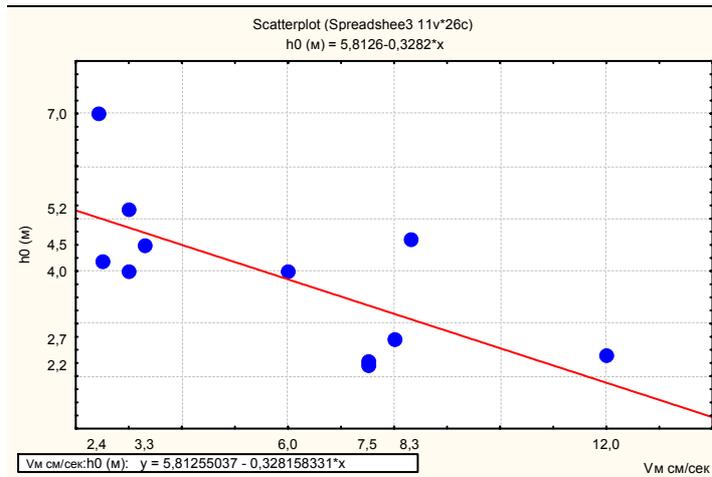


Рис.2 - Зависимость положения линии раздела поля скоростей  $h_0$  от средней скорости поступления в зону смешения лимана вод  $V_m$  морских вод

Зависимость, представленная на рис.2, показывает, что при увеличении притока морской воды  $+V_m$  глубина линии раздела поля скоростей поднимается к поверхности (уменьшается слой  $h_0$ ).

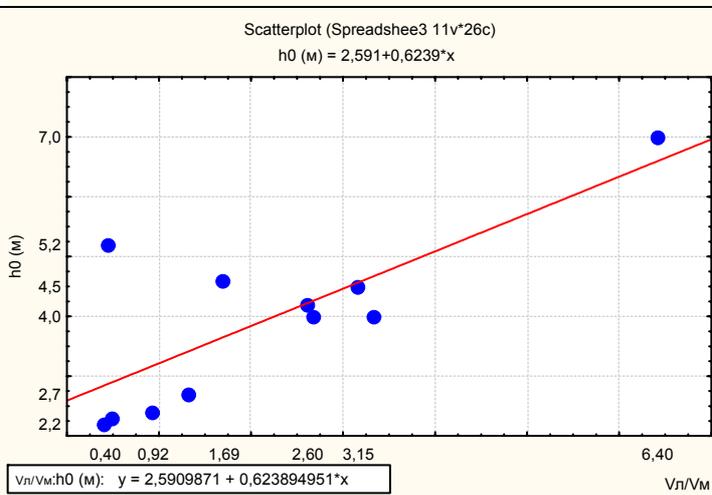


Рис.3 - Зависимость положения линии раздела поля скоростей  $h_0$  от отношения средних скоростей противоположно направленных потоков воды в проливе ( $V_{л}/V_m$ )

Зависимость на рис. 3 показывает однозначно, что при увеличении отношения скоростей ( $V_{л}/V_m$ ) заглубление линии нулевых скоростей возрастает.

Зависимость между специфическими поверхностями, записанными в виде формулы (1), отражает факт объективного существования таких отношений в процессе взаимодействия различных водных масс, морской и лиманной, рис.4б. Теснота взаимодействия характеризуется отношением скоростей, корреляцией  $-0,73$ , табл.2.

Влияние оттока лиманных вод  $V_{л}$  имеет обратную связь с относительной разностью специфических поверхностей, коэффициент линейной корреляции между ними  $-0,61$ , почти достигает вероятности среднего квадратического отклонения  $0,67$ .

Скорость притока в зону смешения морских вод через пролив  $V_m$  оказывает слабое влияние на относительную разность взаимного положения специфических

поверхностей  $\left(\frac{h_s - h_0}{H}\right)$ , формула (8)

$$\left(\frac{h_s - h_0}{H}\right) = 0.1088 - 0.5929(V_{л}/V_{м}), \quad (8)$$

о чем свидетельствует малый коэффициент корреляции между ними, равный 0.26.

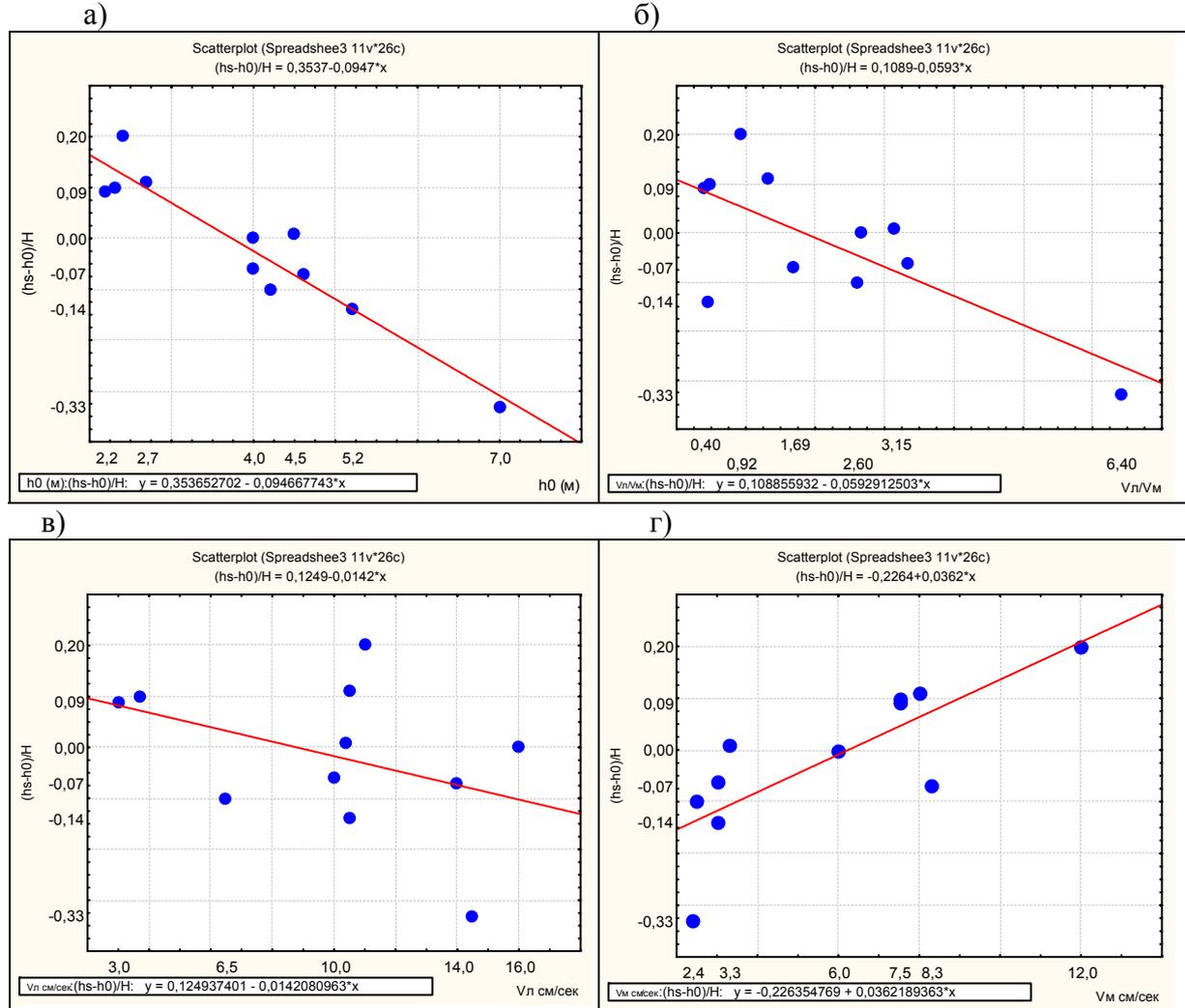


Рис.4 - Зависимость при не установившемся режиме водообмена через

Кинбурнский пролив относительной разности глубин  $\left(\frac{h_s - h_0}{H}\right)$ , скачка солёности

(плотности)  $h_s$  и линии нулевых скоростей  $h_0$ :

а) от глубины линии нулевых скоростей  $h_0$ ,

б) от отношения скоростей вытекающих через пролив лиманных вод и поступающих морских  $(V_{л}/V_{м})$ ,

в) от средней скорости лиманного потока  $V_{л}$ ,

г) от средней скорости морского потока  $V_{м}$ .

Сравнение величин, рассчитанных по уравнению (8) и вычисленных по формуле (7), позволяет сделать заключение о стабильности нетрадиционного показателя  $\left(\frac{h_s - h_0}{H}\right)$ , отражающего механизм формирования зоны смешения в

естественных неустановившихся условиях. В Днепровском лимане сгонно-нагонный режим в среднестатистическом году наблюдается до 80% годового периода.

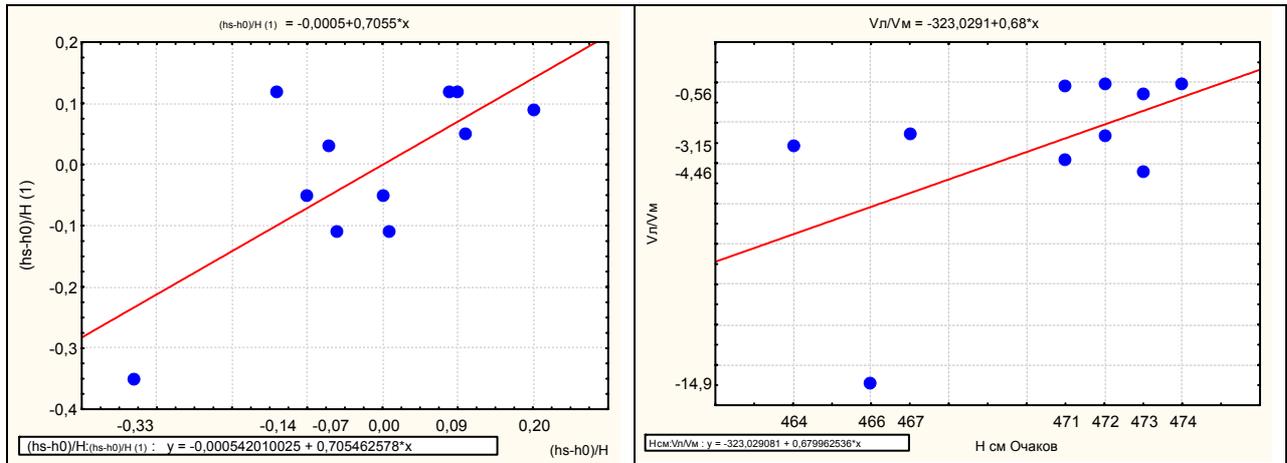


Рис.5 - График связи безразмерного показателя  $\frac{h_s - h_0}{H}$ , рассчитанного по формуле и вычисленного по наблюдениям в 1971 г. имеет корреляцию  $r=0.72$ .

Рис.6 - Зависимость на гидрологическом разрезе Кинбурнского пролива отношения средней скорости вытекающей через пролив лиманной воды к средней скорости поступающей в лиман морской воды ( $V_{л}/V_{м}$ ) от высоты уровня  $H$ . Линейная корреляция  $r= 0.524$ .

Линия связи сравниваемых величин на графике рис.5 проходит под углом  $45^\circ$ , свидетельствует об одинаковой природе их происхождения. Коэффициент линейной корреляции между ними  $0.72$ , достаточный для измеренных характеристик в условиях чрезвычайной изменчивости этого показателя в природе. Следует заметить, что точка с координатами  $(-0.14, 0.44)$ , рис. 4б и другими координатами на рис. 4г, полученная по измерениям 14. IX. 1971г., по нашему мнению, является сомнительной. Это подтверждается также рис. 6, на нем показана зависимость уровня от средних скоростей, характеризующих лиманный и морской потоки через пролив. Точка при уровне  $H=466$  см явно выпадает из общей картины их местонахождения на рисунках, без нее корреляция была бы сильнее, а уравнения связи были бы другими.

Рассмотрим водо- и солеобмен через пролив теоретически, используя балансовые уравнения в дифференциальной форме. Из совместного решения водного и солевого балансовых уравнений получено, что гидрологические характеристики в этой зоне взаимосвязаны следующим рекуррентным соотношением:

$$\bar{S} = \bar{S}_{t=0} \exp \left\{ \left[ \frac{\left( \frac{S_m}{\bar{S}} - 1 \right) Q_m - Q_p - \left( \frac{S_l}{\bar{S}} - 1 \right) Q_l}{v} \right] t \right\}, \quad (9)$$

где  $\bar{S}$  - средняя соленость вод в зоне смешения лимана,  $S_m$  - соленость морских вод, поступающих в лиман через пролив, соединяющий его с морем,  $S_l$  - соленость лиманных вод, вытекающих из лимана через пролив,  $Q_m$  - приток морских вод, поступающих через пролив в единицу времени в зону смешения,  $Q_p$  - приток речных вод, поступающих в зону смешения,  $Q_l$  - расход лиманных вод через пролив,

вытекающих из зоны смешения лимана в море,  $V$  – объем зоны смешения,  $t$  – время. Непосредственный расчет по формулам (9) возможен при наличии сведений о стоке Днепра, водо- и солеобмене в Кинбурнском проливе, относительном содержании речных вод в морской водной массе и морских — в лиманной, кривой объемов, выполненной по длине лимана. Отсутствие полных сведений затрудняет прямое решение задачи.

Указанная теоретическая зависимость может быть использована как структурная при эмпирическом обобщении материалов по водно-солевому режиму. При этом весьма перспективны зависимости, устанавливающие соотношение между соленостью и стоком, так как величину стока можно предвычислять на основе учета планирования хозяйственной деятельности по его использованию в будущем.

Из формулы (9) можно получить соотношение, связывающее водно-балансовые характеристики реверсивного обмена в проливе. Для этого представим объем зоны осолонения  $v$  в виде произведения средней площади водного сечения  $\bar{\omega}$  на протяженность  $x$  осолоненного участка  $v = \omega x$ . Тогда из (9) имеем

$$\frac{x}{t} = \frac{\left(\frac{S_M}{S} - 1\right) Q_M - Q_p - \left(\frac{S_L}{S} - 1\right) Q_L}{\omega \ln \frac{S}{S_{t=0}}}. \quad (10)$$

Каждой *установившейся* фазе процесса взаимодействия речных и морских вод в зоне смешения лимана соответствует

$$Q_L = Q_M + Q_p. \quad (11)$$

Известно также, что при не изменяющемся речном стоке возвратно-поступательное (реверсивное) движение фронта соленой воды в лимане прекращается. В таком случае левая часть (10) равна нулю, поскольку  $\frac{x}{t}$  – скорость перемещения фронта соленой воды в придонном слое. Преобразовывая (10), получим элегантное соотношение между гидрологическими характеристиками водо- и солеобмена в проливе, соединяющем лиман и море:

$$Q_M = \left(\frac{S_L}{S_M - S_L}\right) Q_p. \quad (12)$$

Таким образом, выбирая расчетный интервал  $t$ , достаточный для стабилизации фронта соленой воды (речного створа зоны смешения), тем самым получаем стабильные отношения между  $Q_L$ ,  $Q_M$ ,  $Q_p$ , а также между  $S_L$ ,  $S_M$ , измеряемыми в проливе, соединяющем лиман и море. Для определения притока морской воды в зону смешения лимана требуется знать соленость вод, вытекающих из лимана, и соленость поступающих через пролив морских вод.

#### Выводы.

1. Гидрологический и гидравлический методы изучения реальных зон смешения речных и морских вод устьевых взморий в настоящее время предпочтительнее методов теоретической гидромеханики (истинно и то, что без ее результатов невозможен качественный анализ процессов, происходящих в зоне смешения).

2. В результате изучения водообмена через пролив, на примере Кинбурнского

пролива, соединяющего северо-западную часть Черного моря и Днепровско-Бугский лиман, получены линейные корреляционные оценки взаимосвязанных между собой зависимостей: уровня по водпосту Очаков; средней глубины галоклина (линии скачка плотности на разрезе через Кинбурнский пролив); местоположения средней глубины линии нулевой скорости на разрезе через пролив; относительной разности глубин скачка плотности и нулевых скоростей, определяющих степень динамичности процесса водообмена, включая неустановившиеся фазы; средней скорости лиманной воды, вытекающей в море, и средней скорости поступления в лиман морской воды; отношения средних скоростей вытекающего лиманного потока и поступающего в лиман морского.

3. Высказанные в статье гипотезы, характеризующие процесс водообмена, подтверждены анализом связей гидравлических характеристик, включая нетрадиционные, полученные из натуральных наблюдений, усредненных на суточных масштабах.

4. Показано, что дискретный обмен через поперечное сечение Кинбурнского пролива является частным случаем непрерывного двухслойного, поэтому можно считать, что математические двухслойные модели полностью характеризуют водообмен через двухмерные проливы, соединяющие различные водоемы.

5. Получена теоретическая зависимость установившегося обмена через пролив, позволяющая в сумме с анализируемыми оригинальными гидрологическими (гидравлическими) характеристиками, решать задачи, касающиеся оценки реверсивного водо- и солеобмена лимана с морем.

### Литература

1. Кейлеган Д. Г. Механизм образования неподвижного клина соленой воды. ///- В сб. Гидродинамика береговой зоны и эстуариев. Под ред А.Т. Иппена, -Л.: Гидрометеоздат, 1970. -394 с.

#### **Механізм формування двошарової зони змішення лиману і вплив на неї реверсивного водообміну через протоку. Ілюшин В.Я.**

*Розглянуто механізм формування зони змішення. Встановлено, що в натурних умовах гідромеханічний підхід непродуктивний. Гідрологічний метод вивчення реальних зон змішення річкових і морських вод гирлових узмор'їв в даний час переважний. Висловлені гіпотези про водообмін, включаючи нетрадиційні, підтверджені аналізом зв'язків між гідравлічними характеристиками в Кинбурнській протоці.*

**Ключові слова:** морська і лиманова водні маси, кореляція, поверхня нульових швидкостей, галоклін.

#### **Mechanism of forming of the double-layer estuary mixing area and influence of reversible water cycle through a channel. Iliushin V.Ya.**

*The mechanism of forming of mixing area is studied. It was found that for fully natural conditions the hydromechanic approach is unproductive. Today the hydrological method to study the mixing areas of river and marine coastal waters in estuarine is preferable. The proposed hypotheses about water cycle including untraditional ones are confirmed by the analysis of connections between hydraulic descriptions in the strait of the Kinburn.*

**Keywords:** marine and estuary water masses, correlation, zero speed surface, halocline.