

**В.Я. Илюшин, к.г.н., А.В. Пушкарь, А.В. Ставерская**

*Одесский государственный экологический университет*

## **ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ РЕЧНОЙ СТРУИ НА ВЗМОРЬЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЛУБИНЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ ПРИСОЕДИНЕНИЯ К НЕЙ МОРСКОЙ ВОДЫ**

*В статье рассматривается изменение структуры речной струи при выходе ее на взморье. Анализируется трансформация площади струи, средней скорости и количества движения при различных уклонах дна взморья и разной интенсивности присоединения к ней морской воды.*

**Ключевые слова:** *речная струя на взморье, влияние уклона дна, присоединение морской воды.*

**Введение.** Решение поставленной задачи имеет много аспектов: задачу можно рассматривать с позиций географии, биологии, гидродинамики и т.д. Особенности выхода речной струи на взморье зависят от типа устьевой области: устьевая область может быть расположена на побережье океана, в районах окраинных морей или внутренних; море может быть с приливами или безприливное; взморье приглубое или отмелое; закрытое или открытое; струя выходит из дельтовой равнины многими речными рукавами или одним руслом. Большое значение имеют климатические факторы: взморья арктических морей отличаются от взморий тропиков или средних широт. Перечисленное выше определяет факторы, формирующие структуру речной струи. Ее структура зависит от объема речного стока, поступающего в устьевую область, размера водотока и приемного водоема; от морфометрических особенностей взморья, гидродинамических условий речного потока и взморья (скорости вытекающей речной струи) степени ее турбулентности; сопротивления на морском дне или на границе раздела “морская вода – речная вода”; характера распределения глубин вдоль струи; особенностей присоединения морской воды к речной струе в зависимости от турбулентности в ней; ветровых условий, волнения, бароклинности вод взморья. Структура речной струи определяет особенности геоэкологического барьера данной географической зоны, разграничивающей континентальные и океанические водные массы в зоне контакта вод моря и суши, водных масс, обладающих различными гидрологическими, гидрохимическими, биологическими и др. характеристиками, определяющими среду обитания гидробионтов.

Цель статьи заключается в изучении общих гидрологических особенностей взаимодействия речных и морских вод на взморье при изменении уклона дна взморья и вовлечении в нее морской воды, без учета влияния многих гидрологических процессов, безусловно накладывающих свои особенности на явление.

Трансформацию речного потока в эстуариях при наличии и отсутствии уклона поверхности дна в сторону моря изучал с помощью математической трехмерной модели Чао Шенн [1]. В исследовании показано, что шлейф речной воды на шельфе прослеживается по картине солености воды и зависит от числа Фруда, которое определяется отношением скорости потока в устье эстуария к скорости внутренних гравитационных волн. Наиболее тщательное изучение речной струи на взморье принадлежит Т.Г.Войнич-Сяноженцкому [2] при исследовании осаждения взвешенных наносов, выносимых на устьевое взморье струей. Оценивалась устойчивость стационарного режима растекания речной струи на устьевом взморье, а также возможные интерпретации решений возмущенных и не возмущенных движений потока в речной струе. Общие географические особенности речной струи на взморье

рассмотрены В.Н.Михайловым [3].

**Аналитические результаты, численные эксперименты и их анализ.** Речная струя на взморье рассматривается в условиях однорукавного устья, отсутствия ветра и волнения, сила Кориолиса полагается существенно меньше других сил, а продольная бароклинность незначительной. Процесс растекания речной струи - стационарный. Эти упрощающие идеализации позволяют получить устойчивое решение для одномерных условий [2].

При малом объеме речных вод по сравнению с приемным водоемом и горизонтальной морской поверхностью на взморье, одномерное уравнение гидродинамики записывается в виде

$$\frac{V^2}{C^2 R} + \frac{\alpha V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где  $V$  - усредненная по водному сечению струи скорость течения в ней;

$C$  - коэффициент Шези;

$R$  - гидравлический радиус, который может быть заменен глубиной  $H$ ;

$\alpha$  - корректив кинетической энергии, который определяется соотношением

$$\alpha = \frac{\int V^3 d\omega}{\bar{V}^3 \omega},$$

где  $V, \bar{V}, \omega$  - одномерные реальная скорость, средняя скорость, площадь водного сечения струи;

$g$  - ускорение силы тяжести;

$x$  - продольная координата, отсчитываемая от устьевого створа.

Корректив Кориолиса, иначе - кинетической энергии, в отличие от его малых значений в русловых потоках 1.04-1.10, может на взморье в результате усреднения скорости по водному сечению достигать существенных значений - 1.50 [3].

Структура речной струи в первом приближении оценивается изменчивостью вдоль оси  $X$  расхода воды, площади водного сечения, средней скорости течения воды в ней. Поскольку идет вовлечение морской воды в "речную струю", средняя скорость будет определяться теперь в системе "речная струя на взморье", в том числе, и массой присоединенной к ней морской воды. Поэтому в качестве переменной теперь следует рассматривать "количество движения массы речной струи"[3]. Для перехода к новой переменной умножим и поделим каждую составляющую уравнения (1) на  $\omega_x$ . После преобразования и определения постоянной интегрирования при  $x=0$ , решение уравнения (1) относительно "количества движения" принимает вид

$$V_x Q_x = V_0 Q_0 e^{-\frac{2g}{\alpha C^2 R} x}. \quad (2)$$

**Анализ структуры речной струи.** Понимая, вслед за [2], под речной струей на взморье только количество воды вытекающей из дельтового водотока, т.е.  $Q_x = Q_0$ , из (2) имеем возрастающую по экспоненте площадь струи вдоль оси  $X$

$$\omega_x = \omega_0 e^{+\frac{2g}{\alpha C^2 R} x} \quad (3)$$

Можно вычленил также ту часть речной струи, называемую в аналогичных задачах в гидравлике "ядром струи", в которой средняя скорость струи остается равной средней скорости речного потока в устье водотока. Наносонесущая способность потока в этой части струи на взморье остается прежней. В конце этой части речной струи скорость в ней начнет убывать, поэтому здесь интенсивно отлагаются речные наносы и из этих наносов формируется на взморье речной устьевой бар, начальный элемент надводной части дельты. Площадь сечения ядра речной струи от устьевого створа уменьшается по экспоненте

$$\omega_x = \omega_0 e^{-\frac{2g}{\alpha C^2 R} x} \quad (4)$$

Ядро речной струи разрушается турбулентными вихрями, поэтому его протяженность изменяется в зависимости от развития турбулентности в ней.

Вовлекаемая речным потоком в движение масса морской воды будет ограничивать с боков тело струи поверхностью нулевых скоростей. Также и снизу - в случае приглубого взморья. Поэтому решение этой задачи требует привлечения уравнения неразрывности.

Заметим, что результаты (2)-(4) являются приближенными, поскольку получены при постоянных значениях  $\alpha$ ,  $C$ ,  $R$  или  $H$ . Турбулентность воды в струе, сопротивление движению струи  $C$  на всех ее границах (боковых и на дне), глубина вдоль взморья  $H$  или ее гидравлический радиус  $R$  - вдоль оси  $X$  изменяются. Рассмотрим влияние увеличивающейся глубины на взморье на изменение площади струи в произвольном сечении вдоль оси  $X$ .

**Изменение структуры речной струи с увеличением глубины взморья.** Положим, что глубина увеличивается вдоль оси  $X$  линейно, т.е.  $H = a + bx$ , где  $a = H_0$  - глубина в створе  $x = 0$ ;  $b$  - уклон морского дна (рис.1).



Рис.1 – Изменение глубины вдоль взморья.

Задавая различные  $b$ , при фиксированной глубине в устье  $H_0$ , можно наблюдать изменение речной струи в условиях отмелого и приглубого взморья. Для этих условий решение уравнения Сен-Веннана (1) относительно площади речной струи при  $Q_x = Q_0$  примет вид

$$\omega_x = \omega_0 e^{+\frac{2g}{\alpha C^2 R} \cdot \frac{1}{b} \ln[(H_0 + bx)H_0]} \quad (5)$$

где  $\omega_x$  и  $\omega_0$  - площади водного сечения струи в произвольном створе в “жидких берегах” и в нулевом створе.

При фиксированных коэффициенте кинетической энергии  $\alpha=1.06$  и коэффициенте Шези  $C=50$  и изменениях уклона дна  $b$  вдоль оси  $X$ , по (2) можно проследить изменение площади растекания речной струи с удалением от устья водотока.

Рассчитанные площади водного сечения речной струи  $\omega$  (м<sup>2</sup>) с удалением от устьевого створа и при различных уклонах дна взморья показаны в табл.1 и на рис. 2.

Таблица 1 – Площади водного сечения речной струи, м<sup>2</sup>, в зависимости от уклона дна взморья и расстояния от устьевого створа, м

| уклон | Расстояние, м |       |       |        |        |        |        |        |
|-------|---------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       | 1000          | 2000  | 3000  | 4000   | 5000   | 10000  | 25000  | 50000  |
| 0,010 | 41965         | 65704 | 86686 | 105998 | 124137 | 204321 | 398969 | 664419 |
| 0,012 | 31190         | 45679 | 57716 | 68354  | 78044  | 118449 | 207130 | 316963 |
| 0,014 | 24959         | 34790 | 42592 | 49285  | 55249  | 79095  | 127795 | 184074 |
| 0,016 | 20964         | 28129 | 33619 | 38223  | 42257  | 57888  | 88129  | 121301 |
| 0,018 | 18211         | 23707 | 27802 | 31176  | 34093  | 45125  | 65586  | 87134  |
| 0,020 | 16211         | 20591 | 23781 | 26371  | 28588  | 36806  | 51545  | 66568  |

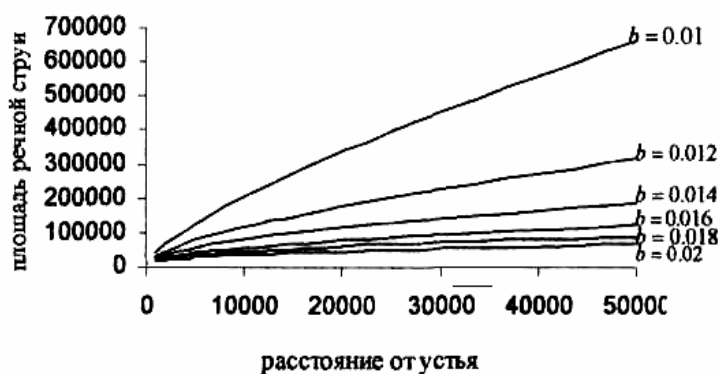


Рис. 2 - Изменение площади (м<sup>2</sup>) растекания речной струи на взморье с удалением ее от устьевого створа (м) при различных уклонах морского дна на взморье.

На рис.2 видно, что с увеличением расстояния площадь сечения струи возрастает по экспоненте. С увеличением уклона морского дна интенсивность увеличения площади речной струи явно уменьшается. Вероятно, это является следствием фиксирования численного значения корректива кинетической энергии  $\alpha$  в эксперименте. Проверка изменчивости числового значения  $\alpha$  возможна по результатам натуральных (полевых) измерений скоростей течений по густой сетке скоростных вертикалей (и точек на вертикалях) в сечениях вдоль речной струи.

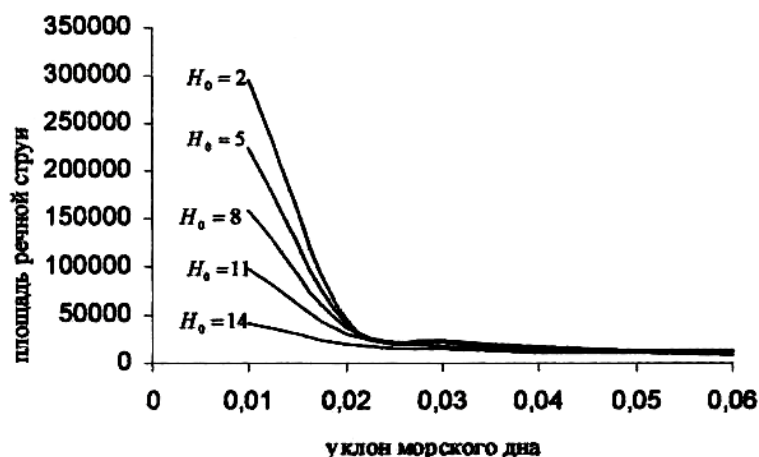


Рис. 3 - Изменение площади речной струи, м<sup>2</sup>, при разных глубинах в устьевом створе H<sub>0</sub> и уклонах дна взморья.

Анализ рис.3 позволяет сделать вывод, что качественное изменение структуры речной струи происходит при уклоне морского дна 0,024 и чем меньше уклон дна взморья, тем ближе эта зона к устью реки. Вероятно, при уклоне дна взморья больше 0.024, происходит отрыв речной струи от морского дна, при этом морфология взморья переходит из категории отмелого в категорию приглубого.

Полученные результаты справедливы при фиксированных гидродинамических условиях, касающихся коэффициента сопротивления движению и степени турбулентности в струе. Ясно, что неизменность этих гидравлических характеристик маловероятна. При изменении глубины вдоль взморья гидродинамические условия в струе будут приспосабливаться к изменяющейся морфологии дна и вихре образованию на поверхности раздела речных и морских вод в соответствии с гидравлическим принципом - минимумом затраты энергии в ходе движения жидкости среды. Поверхность раздела только при большом усреднении является непроницаемой. Присоединение морской воды к речной струе происходит непрерывно, вследствие разрыва непроницаемости поверхности раздела, сворачивания этой поверхности в вихри. С левой стороны границы струи образуются циклонические вихри, а с правой – антициклонические. В результате должен наблюдаться перекося поверхности речной струи на взморье, отмеченный в [1], изменение ее структуры [2] и увеличение площади сечения струи и расхода воды при движении ее в сторону моря.

**Изменение структуры речной струи на взморье в результате присоединяющейся к ней морской воды.** Для решения задачи о нахождении зависимости площади поперечного сечения струи  $Q_x$  от расстояния  $x$ , в условиях присоединения к речной струе морской воды, было использовано соотношение

$$Q_x = \int_0^x q dx + Q_0, \quad (6)$$

где  $q$  – интенсивность присоединения морской воды к речной струе вдоль ее движения.

Уравнение (6) следует из уравнения баланса воды (неразрывности) на участке  $dx$  за время  $dt$ :  $\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = q$ . Для стационарного случая  $\frac{\partial \omega}{\partial t} = 0$ , поэтому  $\frac{\partial Q}{\partial x} = q$ , откуда после интегрирования получаем (6), при условии, что при  $x \rightarrow 0$ , следует  $Q_x = Q_0$ , а  $qx = nQ_0$ .

За  $q$  приняли некоторое количество присоединяемой воды, взятое как доля от  $Q_0$ , в итоге получаем:  $Q_x = Q_0(n+1)$ , где  $n$  – это и есть доля от  $Q_0$ . Далее, после преобразования имеем

$$\omega_x = \omega_0 (n + 1)^2 e^{+\frac{2g}{\alpha c^2 R} x} \quad (7)$$

Задаваясь различными значениями  $n$  от 0,00 до 0,5 и, постепенно меняя  $x$  от 50 до 7000 м, при каждом отдельно взятом  $n$  получаем изменение площади речной струи ( $m^2$ ) в сечениях на расстоянии  $x$  от устьевого створа, при разной интенсивности присоединения к ней морской воды (табл.2).

Таблица 2 – Изменение площади сечения речной струи,  $m^2$ , при разной доле  $n$  присоединения к ней морской воды и растекании ее в море

| $n$  | $x, m$ |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |         |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
|      | 50     | 100   | 200   | 300   | 500   | 1000  | 2000  | 3000  | 4000   | 5000   | 6000   | 7000    |
| 0,00 | 5166   | 5338  | 5699  | 6084  | 6934  | 9616  | 18494 | 35568 | 68404  | 131557 | 253012 | 486598  |
| 0,01 | 5270   | 5445  | 5813  | 6206  | 7073  | 9809  | 18866 | 36283 | 69779  | 134201 | 258098 | 496378  |
| 0,10 | 6251   | 6459  | 6895  | 7361  | 8390  | 11635 | 22378 | 43037 | 82769  | 159184 | 306145 | 588783  |
| 0,20 | 7439   | 7687  | 8206  | 8761  | 9985  | 13847 | 26631 | 51217 | 98502  | 189442 | 364338 | 700701  |
| 0,50 | 11624  | 12010 | 12822 | 13689 | 15602 | 21636 | 41611 | 80027 | 153910 | 296003 | 569278 | 1094845 |

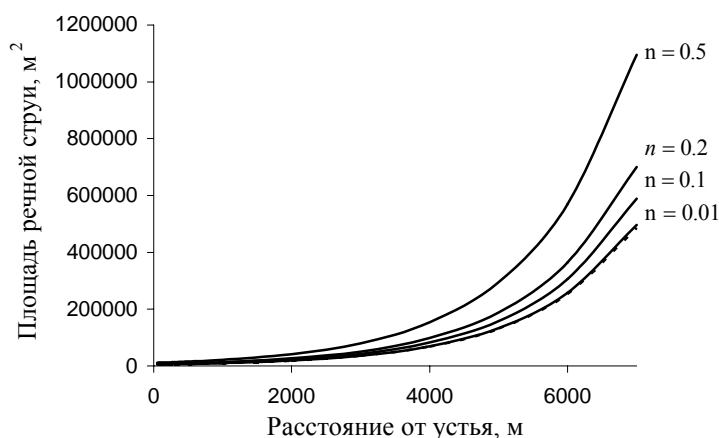


Рис. 4 - Зависимость площади речной струи от интенсивности присоединения к ней морской воды

(при  $\omega_0 = 5000 m^2$ ,  $\alpha = 1.2$ ,  $C = 50$ ,  $R = H = 5m$ ).

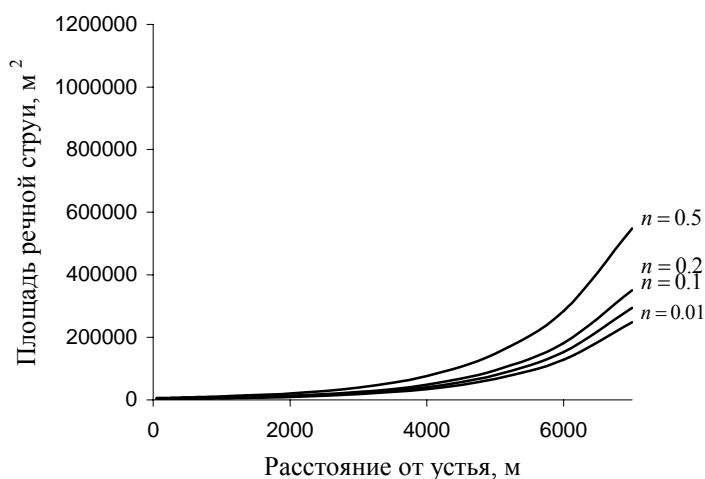


Рис.5 - Зависимость площади речной струи от интенсивности присоединения к ней морской воды

(при  $\omega_0 = 2500 m^2$ ,  $\alpha = 1.2$ ,  $c = 50$ ,  $R = H = 5m$ ).

Из рис. 4,5 видно, что площадь поперечного сечения струи на взморье  $\omega_x$  растет незначительно до 4000 м. Однако, после этого значения наблюдается заметный рост площади струи, причем при максимальном присоединении к речной струе морской воды  $n=0,5$  рост наиболее интенсивный. Перестройка структуры речной струи наиболее заметна на расстоянии 4000-6000 м от устьевого створа. На этом расстоянии, вероятно, идет разрушение ядра речной струи и формируется речной устьевой бар из наносов реки, вследствие уменьшения скорости течения. Здесь наблюдается наибольшая заносимость морских каналов речными наносами и именно здесь должно планироваться ремонтное землечерпание с целью создания проходных глубин для морских судов.

Тенденция роста  $\omega_x$  в зависимости от интенсивности присоединения к речной струе морской воды и расстояния от устьевого створа показана на рис.6.

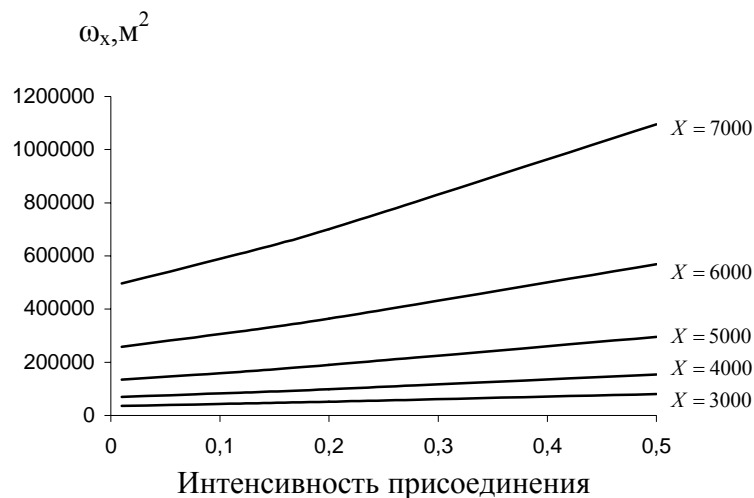


Рис. 6 - Влияние интенсивности присоединения морской воды к речной струе на площадь ее поперечного сечения с удалением от устьевого створа.

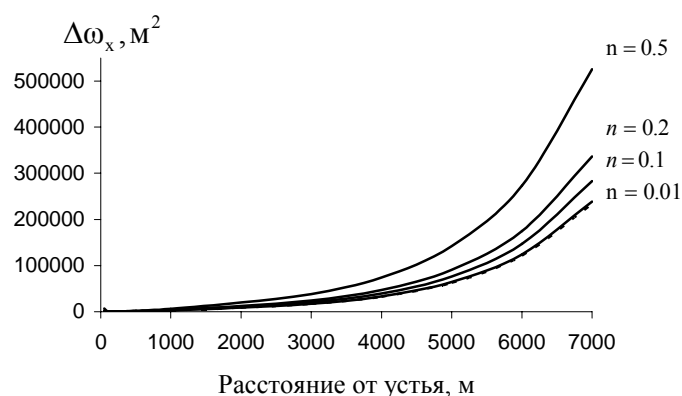


Рис. 7 - Приращение площади речной струи  $\Delta\omega_x, \text{м}^2$  на взморье с удалением от устья.

Рисунок 7 демонстрирует наиболее интенсивное приращение площади сечения речной струи на расстоянии 4000-6000 м от устьевого створа в сторону моря, что не противоречит выводам, следующим из рис.5.

**Выводы.** Анализ результатов численных экспериментов, проведенных с целью выявления влияния уклона морского дна на взморье и интенсивности присоединения к речной струе морской воды, с использованием полученных соавторами аналитических зависимостей, показало следующее:

- с удалением от речного устья площадь речной струи возрастает нелинейно;
- наибольшая перестройка ядра речной струи и, как следствие, формирование речного устьевого бара, происходит на участке удаленном от устья на расстояние 4 – 6 размеров ширины речного русла в устье;

- изменение скорости в речной струе вытекающей на взморье зависит от площади водного сечения потока в устьевом створе, величины речного расхода поступающего на взморье, массы присоединяющейся к струе морской воды и уклона морского дна, сопротивлений на дне и боковых границах раздела “морская вода – речная струя”;

- отрыв речной струи от морского дна происходит при уклоне дна взморья 0.024.

Результаты получены с использованием уравнения Сен-Веннана. Для одномерных условий и при усреднении особенностей динамики струи по времени они достаточно корректны [2]. Численное моделирование шлейфа речной воды на шельфе для трехмерных условий [1] и наблюдения в натуральных условиях [5] проясняют другие интересные особенности речной струи на взморье.

### Список литературы

1. *Chao Shenn-Yn.* River forced estuarine plumes // “J. Phys. Oceanogr.”. 1988, 18, №1. - PP. 72-88.
2. *Войнич-Сяноженцкий Т.Г.* Гидродинамика устьевых участков рек и взгорий бесприливных морей. - Л.: Гидрометеиздат, 1972. - 203 с.
3. *Михайлив В.Н.* Гидрология устьев рек. – М.: Московский университет, 1998. - 175 с.
4. *Корякин Н.И., Быстров К.Н., Чиреев П.С.* Краткий справочник по физике. - М.: ”Высшая школа”. 1969. -597 с.
5. *Диваков И.В.* О расчете трансформации речной струи на устьевом взморье //”Комплекс.исслед.Сев.Каспия”.-М.: 1988. –С.64-69.

**Зміна структури річкового струменя на узмор’ї, при зміні глибини і інтенсивності приєднання до неї морської води. Ілюшин В.Я., Пушкар А.В., Ставерська А.В.**

*У статті розглядається зміна структури річкового струменя, при виході його на узмор’ї. Аналізується трансформація площі струменя, середньої швидкості і кількості руху при різних схилах дна узмор’я і різної інтенсивності приєднання до нього морської води.*

**Ключові слова:** річковий струмінь на узмор’ї, вплив ухилу дна, приєднання морської води.

**Change of river stream structure at the seaside under changes in depth and intensity of salt water confluence. Ilushin V., Pushkar A.V., Staverskay A. V.**

*Change of river stream structure at its reaching the seaside is under consideration in the paper. Transformation of stream transverse area, average speed and linear momentum at various slopes of coast seabed and various intensity of salt water confluence are under analysis.*

**Keywords:** river stream at the seaside, change in seabed slope, intensity of salt water confluence to the river stream.