

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА НЕОДНОРОДНОСТИ СОСТАВА РЕЧНЫХ ВОД

Ю. Д. Чашечкин^{1,*}, О. М. Розенталь²

Представлено академиком РАН А.О. Глико 10.07.2018 г.

Поступило 17.07.2018 г.

Приведены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что пространственно-временное непостоянство состава речных вод нельзя объяснить исключительно влиянием источников и стоков вещества, и существуют дополнительные значимые факторы, поддерживающие или даже инициирующие здесь разброс концентрации загрязняющих веществ. Такой разброс отражается на ресурсно-хозяйственных характеристиках рек, поэтому актуально выяснение его причины. В связи с этой задачей исследована гидродинамическая структура водного потока путём анализа полной системы уравнений механики движения жидкости. Выполненная работа позволила показать, что элементами этой структуры являются волны, вихри и высокоградиентные прослойки (лигаменты), предположительно создающие описанный эффект разброса.

Ключевые слова: реки, химия, состав, неоднородная структура, сохранение, физические механизмы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845605-609>

Значимость рек для хозяйственной и иной деятельности человека общеизвестна [1], в связи с чем повышенное значение имеет исследование природы пространственно-временного непостоянства состава речных вод. В соответствии с существующими представлениями показатель такого непостоянства — коэффициент разброса контролируемых показателей — должен ослабевать в условиях, когда над внешними дестабилизирующими факторами и процессами “самоочищения” преобладают перемешивание и диффузия. Однако имеются наблюдения, которые свидетельствуют о нарушении этого правила. Так, известно, что воды рек, объединившихся в общее русло, иногда не перемешиваются на протяжении десятков километров вдоль по течению [2]. Резкая граница между речными потоками отчётливо видна в случае разноцветных вод, например, объединяющихся рек Миссисипи и Миссури или Рио Негро и Амазонки. О затормаживании процесса формирования однородного состава речных вод или даже об увеличении его неоднородности свидетельствует и гидромониторинг, показывающий, что характеристика описываемого разброса — коэффициент

вариации концентрации примеси в речном потоке — часто превышает 100% даже в условиях очевидно слабого влияния внешних воздействующих факторов [3], в том числе при относительном геохимическом постоянстве подстилающих пород. Таковы, например, данные гидрохимических постов на одной из наиболее крупных рек мира — Оби (рис. 1).

Представляет интерес исследование гидродинамической структуры водного потока с позиции её возможного влияния на описанный эффект. Трудно обнаружить силы, влияющие на перераспределение растворённого в воде вещества, попросту увлекаемого её течением, ламинарным или даже турбулентным. Нельзя, например, рассматривать течение реки Обь как причину десятикратного изменения в ней концентрации примеси, как на рис. 1, хотя это наблюдается на различных контрольных створах для широкого круга загрязняющих веществ. Однако имеются свидетельства существования причинно-следственной связи гидродинамических и гидрохимических процессов. Известно, например, перераспределение компонентов раствора и формирование пространственно-временных структур при массопереносе в реакционных средах [4–6]. Таково следствие взаимосвязи молекулярных, надмолекулярных и макроскопических процессов, благодаря чему диффузия в жидкостях осуществляется путём броуновского движения не

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской Академии наук, Москва

² Институт водных проблем
Российской Академии наук, Москва

* E-mail: chakin@ipmnet.ru

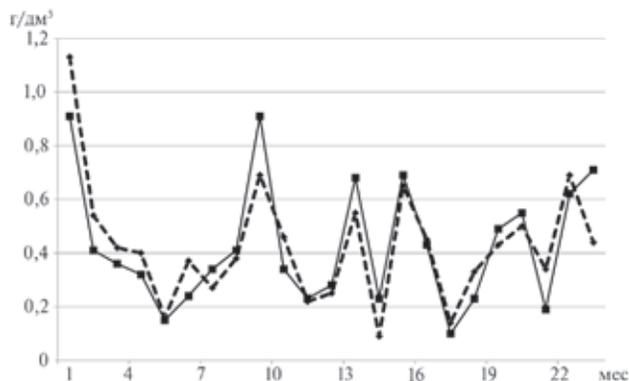


Рис. 1. Зависимость концентрации (ось ординат) иона аммония в р. Обь, 13,7 км ниже г. Барнаула, при ежемесячных наблюдениях (на оси абсцисс указан номер месяца, начиная с января 2009 г. до декабря 2010 г.) в центре речного потока (сплошная линия) и у берега (штриховая).

только единичных частиц, но и их кластеров из десятков, сотен, тысяч и т.д. единиц – процесса, который простирается на широкий диапазон размеров [7, 8]. В результате возможен дрейф частиц примеси в отсутствие видимых макроскопических сил [9].

Как видно, имеются основания для предположения о влиянии элементов гидродинамической структуры водного потока (возникающих в условиях сдвиговых напряжений, связанных с неровностями подстилающих поверхностей, волнообразованием, термоградиентами, гравитацией, поверхностным натяжением и т.д.) на перераспределение растворённого вещества.

Для анализа природы подобных причинно-следственных явлений в рамках теории сплошной среды учитывалось, что физические свойства водного потока определяют механические, кинетические и термодинамические параметры. В число последних входят внутренняя и свободная F энергии, энтальпия и потенциал Гиббса G , а также их производные, такие как энтропия $s = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P$, коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела агрегатных состояний

площадью S_f $\sigma = \left(\frac{\partial F}{\partial S_f}\right)_{T,P}$, химический потенциал $\mu = \left(\frac{\partial G}{\partial S_i}\right)_{T,P,S_j}$, плотность $\rho = \frac{1}{V} = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T^{-1}$, давление P , температура T , концентрация контаминантов S_i и кинетические коэффициенты, характеризующие кинематическую вязкость ν , температуропроводность κ_T , диффузию κ_{S_i} [10–12].

Сумма дифференциалов всех компонентов энергии речного потока – внешней

потенциальной, механического движения, внутренней энергии (включающей доступную потенциальную поверхностную энергию σdS_f), химической энергии $\mu_i dS_i$, связанной с изменением концентраций dS_i веществ – позволяет оценить дифференциал потенциал Гиббса:

$$dG = -s dT + V dP + \mu_i dS_i - S_f d\delta. \quad (1)$$

При этом полная система уравнений механики жидкости, включающая замыкающие уравнения состояния для потенциала Гиббса и плотности, а также уравнения переноса импульса $\mathbf{p} = (p_i)$, температуры, концентрации компонентов S_i с источниками импульса, температуры и вещества Q_i , Q_T , Q_S , имеет вид

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(P, T, S_i), \quad G = G(\mathbf{x}, t), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial p_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial (p_i)}{\partial t} + \left(\frac{p_j}{\rho} \nabla_j\right) p_i &= -\nabla_i P + \rho g_i + \nu \Delta(p_i) + Q_i, \quad (2) \\ \frac{\partial \rho T}{\partial t} + \nabla_j \cdot (p_j T) &= \Delta(\kappa_T \rho T) + Q_T, \\ \frac{\partial \rho S_i}{\partial t} + \nabla_j \cdot (p_j S_i) &= \Delta(\kappa_{S_i} \rho S_i) + Q_{S_i}. \end{aligned}$$

Система (2) дополняется физически обоснованными граничными условиями (прилипания для импульса и скорости – следствия конечности плотности, баланса вещества на границах, динамического и кинематического условия на свободной поверхности).

Решения системы, построенные с учётом условия совместности, определяющего её ранг, порядок линейаризованной версии и степень характеристического (дисперсионного) уравнения, позволяют рассчитывать динамику и тонкую структуру течений.

В основу классификации компонентов водного потока, описываемых системой (2), были положены семейства решений для линейаризованной версии системы периодических течений вида $A = A_k \exp i(\mathbf{k}\mathbf{x} - \omega t)$ (частота $\omega > 0$, комплексное волновое число учитывает пространственное затухание $\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 + i\mathbf{k}_2$), которая в случае малости диссипативных коэффициентов относится к сингулярно возмущённым и может быть изучена методами теории возмущений.

Семейство сингулярно возмущённых компонентов полного решения системы (2) характеризует волны и тонкие прослойки с высокими градиентами параметров (лигаменты), порядки поперечных масштабов которых определяются

диссипативными коэффициентами и оценочной частотой периодического течения $\delta_\omega^v = \sqrt{\nu/\omega}$ и $\delta_\omega^{k_s} = \sqrt{\kappa_s/\omega}$.

В случае обтекания препятствия с характерным размером a равномерным потоком со скоростью U функция тока регулярного решения, имеющая вид

$$\Psi_b = 2aD\sqrt{\frac{2\pi}{x}} \sin \frac{Nx}{U},$$

визуализируется в вертикальной плоскости как система полос или полуокружностей с шагом $\lambda = UT_b$ (распределение плотности считается экспоненциальным $\rho = \rho_0 \exp(-z/\Lambda)$ с масштабом

$\Lambda = \left| \frac{d \ln \rho}{dz} \right|^{-1}$, частотой $N = \sqrt{\frac{g}{\Lambda}}$ и периодом пла-

вучести $T_b = \frac{2\pi}{N}$, ось x горизонтальна, ось z вертикальна, начало координат — в центре полосы, g — ускорение свободного падения, $D = \sqrt{\nu U / 4\pi}$. Поперечный масштаб сингулярных компонентов здесь определяется диссипативными параметрами среды и скоростью течения $\delta_U^v = \nu/U$ и $\delta_U^{k_s} = \kappa_s/U$.

Анализ системы уравнений (2) позволил установить, что формирующиеся лигаменты в струе первоначально однородно стратифицированной жидкости способны оказывать влияние на состав воды. Как сингулярно возмущённые компоненты они абсорбируют и концентрируют поступившие на них загрязняющие вещества, инициируя перераспределение концентрации в потоке. Этот

процесс описывается особыми характеристиками ряда решений, обладающих свойствами аттракторов. При этом малость коэффициентов диффузии в водной матрице обеспечивает продолжительность существования тонкого (при $\varepsilon = \kappa_s/\nu \ll 1$) лигамента.

В экспериментальной части работы исследовался процесс распределения введённых в воду добавок концентрированного раствора азотно-кислого уранила, более светлого на общем тёмном фоне (рис. 2). В случае, если жидкость покоилась относительно препятствия с цилиндрической поверхностью, растворение примеси происходило через стадию образования неправильной формы “клубов” с диффузными краями (рис. 2а). Однако при организации движения воды относительно препятствия картина изменялась. Растворение затормаживалось, и формировались тонкие ритмически перемежающиеся слои повышенной и пониженной концентрации уранила (рис. 2б). Их вид напоминал некоторые структуры Лизеганга [13], возникающие при химических реакциях или при переносе веществ в жидких средах.

В описанном эксперименте учитывался единственный влияющий на жидкую струю фактор — препятствие. Смоделировать структуру речного потока с учётом многих влияющих факторов не представляется возможным. Однако известные факты формирования в водных растворах с массопереносом пространственно-временных образований [4–7, 13], а также и обнаруженное нами

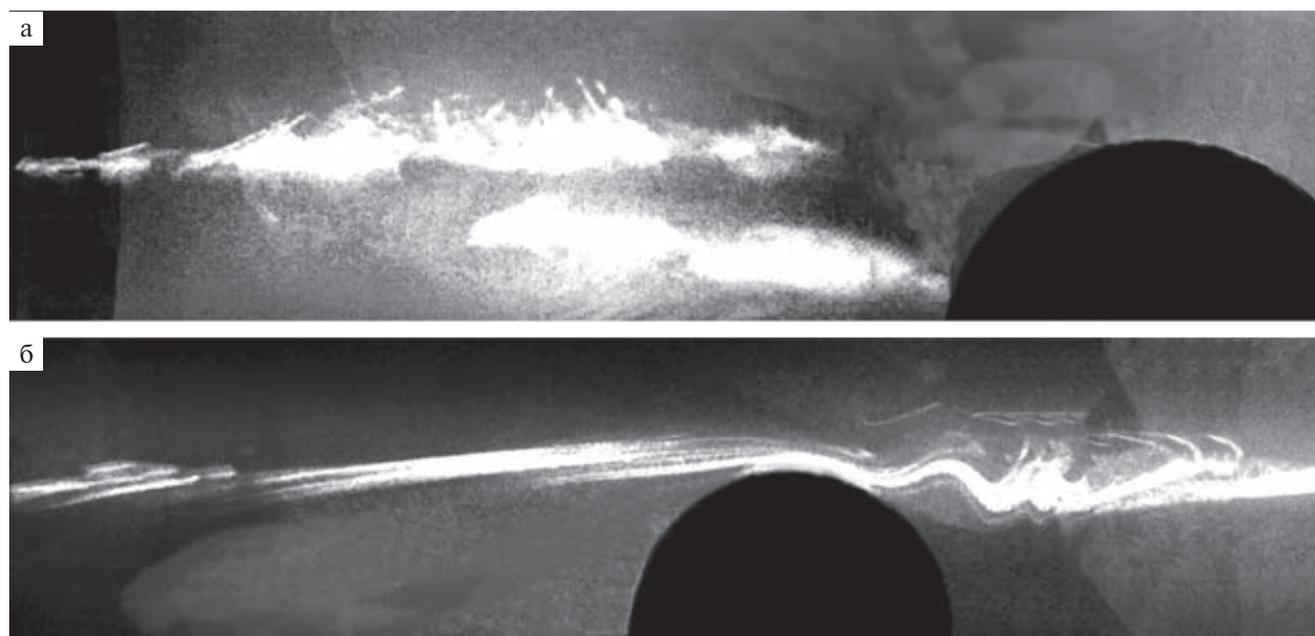


Рис. 2. Типичная картина распределения уранила в воде до (а) и после (б) организации её перемещения со скоростью 0,3 см/с относительно цилиндра диаметром 7,6 см через время $t = 1$ мин после введения примеси.

структурообразование в потоке указывают на возможное формирование внутренних волн, вихрей и лигаментов (см., например, волнистую структуру слоёв раствора позади препятствия на рис. 2б), влияющих на перераспределение растворённого в воде вещества.

Таким образом, опровергается кажущееся очевидным представление о том, что растворённые в воде вещества попросту увлекаются речным потоком, который заметным образом не может влиять на их разброс. Подобный упрощённый подход не предусматривает возможности формирования таких элементов гидродинамической структуры, как волны, вихри и лигаменты, поддерживающие или даже инициирующие разброс примеси за счёт гидродинамических факторов. Между тем, существование в потоке подобных элементов и их гидрохимическая “активность” находят теоретическое и экспериментальное подтверждение. Авторы предполагают, что учёт влияния на разброс растворённого вещества гидродинамической структуры водного потока, а также разработка методов управления ею будут в значительной степени способствовать прогнозу свойств воды и совершенствованию водохозяйственного управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Реки и озера мира. Энциклопедия / Под ред. В.И. Данилов-Данильяна. М.: Энциклопедия, 2012. 925 с.
2. <https://www.tripadvisor.ru/ShowUserReviews-g303235-d554183-r229755948>.
3. *Rozental O.M., Averbuch A.I.* Water Resources Development: Economic and Legal Aspects // Introduction Water Qualimetry. 2013. V. 40. № 4. P. 447–461.
4. *Grill S., Zykov V.S., Muller S.C.* Feedback Controlled Dynamics of Meandering Spiral Waves // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. № 18. P. 3368–3371.
5. *Rossi F., Vanag V.K., Epstein I.R.* Pentanary Cross-Diffusion in Water-in-Oil Microemulsions Loaded with Two Components of the Belousov-Zhabotinsky Reaction // Chemistry. 2013. V. 17. № 7. P. 2138–2145.
6. *Hou M.J., Shah D.O.* Effects of the Molecular Structure of the Interface and Continuous Phase on Solubilization of Water in Water/Oil Microemulsions // Langmuir. 1987. V. 3. P. 1086–1096.
7. *Anikeenko A.V., Malenkov G.G., Naberukhin Yu.I.* Visualization of the Collective Vortex-Like Motions in Liquid Argon and Water: Molecular Dynamics Simulation // J. Chem. Phys. 2018. V. 148. № 9. P. 1660–1662.
8. *Аникеенко А.В., Наберухин Ю.И.* Крупномасштабные и долговременные корреляции в коллективных движениях атомов жидкого аргона. Компьютерное моделирование // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 5. С. 269–274.
9. *Зицерман В.Ю., Махновский Ю.А., Трахтенберг Л.И. и др.* Дрейф частиц, обусловленный флуктуациями их размера // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105. № 5. С. 315–321.
10. *Chashechkin Yu.D.* Differential Fluid Mechanics – Harmonization of Analytical, Numerical and Laboratory Models of Flows // Math. Modeling and Optim. of Complex Struct. Springer Ser. Computat. Methods in Appl. Sci. 2016. V. 40. P. 61–91.
11. *Зоммерфельд А.* Термодинамика и статистическая физика. М.: Изд-во иностр. лит., 1955. 482 с.
12. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
13. *Sukharev Yu.I., Markov B.A.* Liesegang Operator. Liesegang Rings as the Common Gross-Property of Oxyhydrate Gel Polymer Systems. The Chemistry Preprint Server. 7 April 2000. <http://preprint.chemweb.com/physchem/0104005>.

THE PHYSICAL NATURE OF HETEROGENEITY OF THE COMPOSITION OF RIVER WATER

Yu. D. Chashechkin¹, O. M. Rosenthal²

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

²Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS A.O. Gliko July 10, 2018

Received July 17, 2018

Experimental data are presented to show that the spatial and temporal variability of the composition of river waters cannot be explained solely by the influence of sources and effluents of the substances and that there are additional significant factors that support or even initiate the dispersion of the concentration of pollutants here. This variation is reflected in the resources and the economic characteristics of the rivers; so identification of its reason is important. Thus, the hydrodynamic structure of the water flow is studied by analyzing the complete system of equations of fluid motion mechanics. The completed work allowed us to show that the elements of this structure are waves, vortices, and highly gradient layers (ligaments), presumably creating the described dispersion effect. Further investigation of the relationship of the precise hydrodynamic and hydrochemical structures of river waters will contribute to better understanding of the water-environmental processes, ensuring the perfection of water management methods.

Keywords: rivers, chemistry, composition, heterogeneous structure, conservation, physical mechanisms.