

вергающихся выплывающему воздействию льдов. В период весеннего разрушения ледяной покров может играть и положительную роль, очищая устьевое взморье Волги, Урала и прибрежные мелководья от отмершей прошлогодней растительности, снижая тем самым вероятность возникновения здесь заморных явлений в теплый период года.

В связи с вышеизложенным, представляется целесообразным в ходе дальнейших зимних исследований, а также гидрологических работ в весенне-летние периоды проводить подводные обследования морского дна для выявления его нарушений дрейфующими льдами, особенно в местах крупных стамух, обнаруженных в зимний период.

### Литература

1. Катунин Д.Н., Хрипунов И.А. Динамика грунтов северной части Каспийского моря // Известия Всесоюзного географического общества. Том 103, вып. 5, 1971. – С.469-473.
2. Бухарицин П.И. Опасные гидрологические явления на Северном Каспии // Водные ресурсы. 1994. Т. 21, № 4. –С. 444-452.
3. Кошечкин Б.И. Следы деятельности подвижных льдов на поверхности дна мелководных участков Северного Каспия // Труды лаборатории аэрометеодов АН СССР. – М.–Л.: 1958. Т. 6. С. 227-234.
4. Buharitsin P., Ayazbayev E. The role of drifting ice in building the bottom landscape and sediment composition in the shallow waters of north Caspian sea // Material of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (June 9-13, 2013, Espoo, Finland). Finland, Helsinki 2013. (электронный вариант, на флэш-карте) – 4с.

## ОЦЕНКА ПРЕДСКАЗУЕМОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Гельфан А.Н.  
Институт водных проблем РАН, г. Москва  
hydrowpi@aqua.laser.ru

**Введение.** Исследование предсказуемости динамики природных систем – традиционная задача для многих геофизических дисциплин. В метеорологии, например, такие исследования опираются на развитые в классических работах Э. Лоренца [1, 2] фундамен-

тальные представления о двух типах предсказуемости: предсказуемости первого рода, обусловленной внутренней неустойчивостью атмосферных процессов, их высокой чувствительностью к малым возмущениям начальных условий и предсказуемости второго рода, связанной с изменчивостью внешних по отношению к атмосфере воздействий (океан, поверхность суши). Изучение физических механизмов и факторов предсказуемости, определение ее пределов в зависимости от пространственно-временных масштабов исследуемых процессов, идентификация потенциально предсказуемых структур – эти и другие задачи научной метеорологии решаются на базе развитых уже полвека назад фундаментальных представлений об анализе предсказуемости как проблеме математической физики (см., например, [3]).

В гидрологии суши понятие предсказуемости на протяжении многих лет ассоциируется, как правило, с возможностью построения методики оперативного прогноза, соответствующего заданным критериям точности и заблаговременности (см., например, [4-6]). Такое понимание предсказуемости близко к принятому в метеорологии понятию «эффективной предсказуемости» [7] или прогнозируемости (“forecastability”), которая зависит, в том числе, от субъективных факторов, включая опыт и методические предпочтения разработчиков, особенности имеющейся сети наблюдений и т.п. Интерес к анализу предсказуемости, как объективному свойству гидрологической системы, возник в последние годы и связан, прежде всего, с исследованиями макромасштабной изменчивости характеристик влажности почвы и снежного покрова, направленными на углубление представлений о вкладе низкочастотной изменчивости этих характеристик в динамику климатической системы (например, [7-10]). Кроме того, появились публикации, в которых исследуются факторы, влияющие на предсказуемость гидрологических процессов в масштабах речного бассейна, такие как: пространственное усреднение процессов [11], нелинейность гидрологических систем [12], погрешности задания начальных условий [13], гидравлические свойства бассейна [14]. Влияние неопределенности начальных и граничных условий на предсказуемость быстроразвивающихся дождевых паводков и сезонных характеристик речного стока рассмотрено в работах [6], [15]. Есть основания полагать, что построение концептуальных основ анализа предсказуемости гидрологических систем становится одной из ключевых проблем научной гидрологии

[16, 17], что подтверждается, в частности, программой нового гидрологического десятилетия, инициированного Международной Ассоциацией гидрологических наук [18, см. также сайт рабочей группы МАГН по проблеме гидрологической предсказуемости <http://www.phyp-wg.ru/participants.html>].

Значительные возможности создания методов изучения физических механизмов и оценки предсказуемости гидрологических систем связаны с использованием достижений в области анализа динамики стохастических систем [3, 10, 19]. В настоящей статье такие возможности реализованы на примере оценки предсказуемости влагосодержания мерзлой почвы – основного фактора потерь талого стока при формировании весеннего половодья в бассейнах равнинных рек с преимущественно снеговым питанием.

**Методика оценки предсказуемости гидрологической системы.** Рассмотрим динамико-стохастическую систему, описываемую уравнением [3]:

$$\frac{dW}{dt} = B(W) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

$$W|_{t=0} = W_0, \quad (2)$$

где  $W = W(t)$  – переменная состояния системы;  $B(W)$  – динамический оператор,  $\varepsilon(t)$  – дельта-коррелированный во времени гауссов случайный процесс  $\langle \varepsilon_i(t) \times \varepsilon_j(t') \rangle = 2d_{ij} \delta(t - t')$ ,  $d_{ij} > 0$ ;  $\langle \rangle$  – оператор усреднения.

В гидрологических задачах динамико-стохастическое уравнение (1) используется для описания динамики увлажнения территорий, межгодовых изменений речного стока, колебаний уровней бессточного озера, динамики объема горных ледников (см., например, [10, 20, 21]).

В работе [19] показано, что при условии  $d_{ij} \equiv d$  для уравнения (1) может быть записано уравнение Фоккера-Планка для функции плотности вероятности  $\rho(W)$

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(B(W)\rho) = d\Delta\rho \quad (3)$$

$$\rho \geq 0, \int \rho dW = 1 \quad (4)$$

Учитывая начальное условие (2), аналогичное начальное условие для уравнения (3) записывается как:

$$\rho|_{t=0} = \delta(W - W_0). \quad (5)$$

Показано (см., например, [3]), что с течением времени функция плотности вероятности состояния системы  $\rho(W)$  будет сходиться к стационарному решению  $\bar{\rho}$ , и информация о начальном условии будет системой теряться. Временной интервал, в течение которого система сохраняет информацию о своем начальном состоянии, может быть задан временем сходимости заданной вероятностной меры к ее устойчивому значению и определяет потенциальную предсказуемость системы.

Для сложной, нелинейной системы реализация описанного методического подхода возможна путем вычислительных экспериментов с численной динамико-стохастической моделью со случайными входами, описывающей динамику состояний этой системы. Указанная возможность будет иллюстрирована ниже на примере динамико-стохастической модели неизотермического влагопереноса в мерзлой почве.

**Динамико-стохастическая модель неизотермического влагопереноса в мерзлой почве, организация и результаты численных экспериментов.** Общие подходы к построению динамико-стохастических моделей гидрологических процессов, использованные в настоящей статье, предложены в монографии [22].

В структуре разработанной динамико-стохастической модели объединены два компонента: (1) физико-математическая (динамическая) модель вертикального влагопереноса в мерзлой почве с учетом накопления и таяния снежного покрова на поверхности почвы и (2) стохастические модели внутрисезонных изменений суточных величин осадков, температуры и влажности воздуха.

Физико-математическая модель основана на системе нелинейных уравнений тепло- и влагопереноса в частных производных и описывает гидротермический режим почвы в процессе ее промерзания, оттаивания и инфильтрации талой воды с учетом фазовых переходов вода-лед, влияния переохлажденной влаги. Используемая система уравнений и методы их численного интегрирования, результаты испытаний модели по данным лабораторных и натуральных экспериментов в гидрофизической лаборатории Государственного гидрологического института и натуральных наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции описаны в работе [23]. Система стохастических моделей (т.н. «стохастический генератор погоды»),

позволяющих воспроизводить методом Монте-Карло многолетние искусственные последовательности метеорологических переменных суточного разрешения для задания их на входе физико-математической модели, описана в [24]. Там же приведены результаты калибровки и тестирования генератора погоды по данным метеорологических измерений на территории лесостепной зоны ЕТР.

Численные эксперименты для оценки потенциальной предсказуемости влагозапасов почвы в осенне-зимний период проводились с использованием данных наблюдений на Нижнедевицкой воднобалансовой станции и были организованы следующим образом.

Расчеты велись для периода с 1 ноября по 31 марта. Начальные условия для решения уравнений тепло- и влагопереноса задавались в виде постоянных по глубине 1-метровой почвенной колонки значений суммарной (жидкая вода + лед) влажности и температуры. С помощью стохастического генератора погоды моделировался ансамбль из 1000 реализаций значений метеорологических переменных суточного разрешения за период с 1 ноября по 31 марта. Температура воздуха, осадки и рассчитанное по влажности воздуха испарение почвенной влаги задавались в качестве граничных условий для расчетных уравнений тепло- и влагопереноса при отсутствии снега. При наличии на поверхности почвы снежного покрова (его характеристики рассчитывались по сгенерированным метеорологическим «входам») граничные условия задавались в виде потоков тепла и влаги на границе снег-почва.

В результате с помощью динамико-стохастической модели был рассчитан ансамбль из  $N=1000$  траекторий изменения суточных значений влажности  $W_{ijk} = W_k(z_i, t_j)$  и температуры почвы  $T_{ijk} = T_k(z_i, t_j)$  на разных глубинах в период с 1 ноября по 31 марта (здесь  $k$  - номер расчетной траектории,  $k=1,2,\dots, N$ ;  $z_i$  -  $i$ -й расчетный 10-см слой по глубине 1-метровой почвенной колонки от ее поверхности;  $i=1,2,\dots,10$ ;  $z_i=[10(i-1);10i]$  [см];  $t_j$  -  $j$ -й суточный интервал времени от начала расчетов  $j=1,2,\dots,151$ ;  $t_j=[(j-1); j]$  [сут]). Каждая из 1000 траекторий рассчитывалась, таким образом, при заданных (одинаковых для всех расчетов) начальных и случайных граничных условиях. Рассчитанные траектории изменения суммарного влагосодержания верхнего 10-см слоя почвы при постоянной по глубине  $z$  начальной объемной влажности, равной 0.15 и

температуре почвы, равной  $3^{\circ}\text{C}$ , показаны на рис. 1 (в качестве примера показаны 50 из 1000 траекторий).

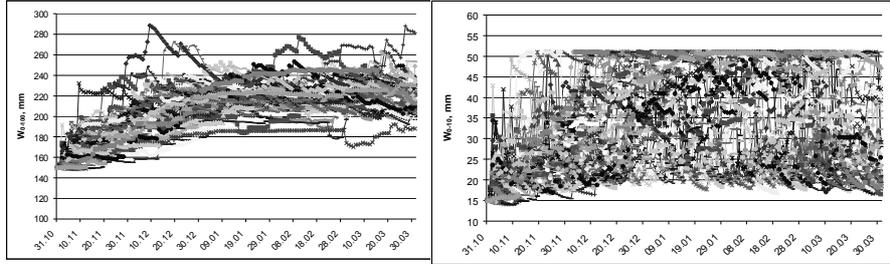


Рис. 1 – Ансамбль траекторий значений суммарного влагосодержания (мм) метрового (слева) и верхнего 10-см (справа) слоев промерзающей почвы, рассчитанных при одинаковых начальных ( $W(z,0)=0.15$ ;  $T(z,0) = 3^{\circ}\text{C}$ ) и смоделированных методом Монте-Карло граничных условиях

Для каждого расчетного шага  $t_j$  и почвенного слоя  $z_i$  рассчитывалось среднеквадратическое по ансамблю  $N=1000$  траекторий отклонение  $\sigma_{ij}(W)$  влажности почвы:

$$\sigma_{ij}(W) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (W_{ijk} - \bar{W}_{ij})^2 \times (N-1)^{-1}} \quad (6)$$

где  $\bar{W}_{ij} = N^{-1} \sum_{k=1}^N W_{ijk}$  – среднее по ансамблю траекторий значение влажности почвы в слое  $z_i$  и на временном шаге  $t_j$ .

Величина  $\sigma_{ij}(W)$  задавалась в качестве вероятностной меры, по времени сходимости которой к устойчивому значению определялась потенциальная предсказуемость влажности почвы. Горизонт потенциальной предсказуемости  $\Delta_i(W)$  влажности почвенного слоя  $z_i$  оценивался из условия:

$$\Delta_i = \min(j) : \left| \frac{\sigma_{ij} - \sigma_{i(j-1)}}{\sigma_{ij}} \right| \leq \alpha, \quad j=1,2,\dots,151 \quad (7)$$

На рис. 2 показано, как меняется величина  $\sigma_{ij}(W)$  по мере удаления от начальной расчетной даты расчета (1 ноября) при разных начальных условиях (на примере суммарных влагозапасов метрового слоя промерзающей почвы).

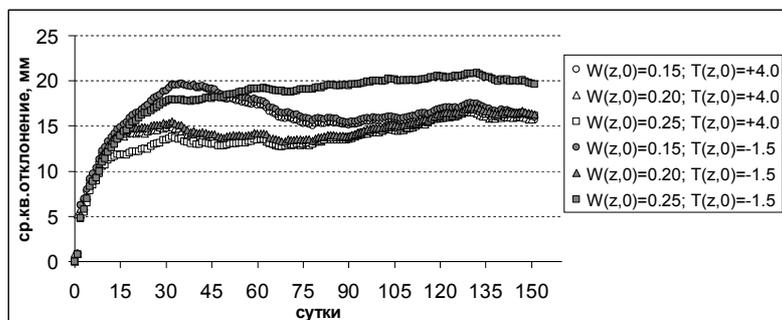


Рис. 2 – Изменение средневлажности по ансамблю 1000 траекторий отклонения рассчитанной влажности метрового слоя промерзающей почвы по мере удаления от начальной расчетной даты расчета (1 ноября) при разных начальных условиях

Оказалось, что предел предсказуемости суммарных влагозапасов почвенной колонки, рассчитанный по формуле (7) при  $\alpha = 1\%$ , меняется в довольно узком диапазоне - от 31 до 42 суток, при заданных значительных изменениях начальных условий ( $W(z,0)=0.15\div 0.25$ ;  $T(z,0)=-1.5\div +4^{\circ}\text{C}$ ). В целом, полученные оценки предсказуемости запаса влаги для отдельных 10-см слоев промерзающей почвенной колонки показали, что предсказуемость растет с увеличением глубины слоя: для нижнего слоя 90-100 см предсказуемость достигает 74 суток. Предсказуемость растет также с ростом толщины почвенного слоя.

Проведены две серии численных эксперимента по оценке чувствительности рассчитанного предела предсказуемости запаса влаги метрового слоя промерзающей почвы: (1) к изменениям ее механического состава, влияющего на гидравлические и теплофизические параметры уравнений тепло- и влагопереноса, а также (2) к изменениям климатических норм температуры и осадков, задаваемых в качестве параметров стохастического генератора погоды. Результаты численных экспериментов показаны на рис.3. Проведенные эксперименты показали, что предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы растет для почв более тяжелого механического состава, достигая для тяжелого суглинка 51 суток. Вместе с тем, изменения климатических характеристик не повлияли на предсказуемость влагозапаса почвы.

Таким образом, важным свойством рассматриваемой системы является то, что ее предсказуемость зависит от внутренних свойств

системы в большей степени, чем от характеристик вынуждающего процесса. Аналогичный результат для линейной динамико-стохастической системы получен аналитически в работе [10].

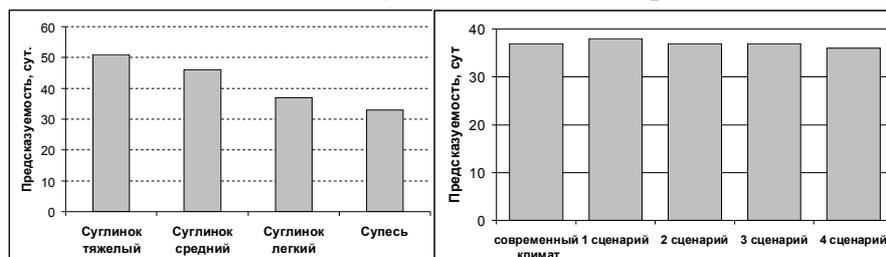


Рис. 3 – Предсказуемость влагозапаса метрового слоя промерзающей почвы в зависимости от ее механического состава (слева) и климатических норм (справа) температуры воздуха  $T_a$  и осадков  $P$ : (сценарии: 1 –  $T_a$  увеличена на  $2^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T_a$  – на  $1^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $P$  увеличена на 10%; 4 –  $P$  – на 20%)

**Закключение.** В работе предложен метод оценки потенциальной предсказуемости гидрологической системы на основе динамико-стохастической модели со случайными входами, основанный на расчете времени сходимости дисперсии состояния системы к ее устойчивому значению. Метод применен для оценки предсказуемости запасов влаги в промерзающей почве. С помощью численных экспериментов с разработанной моделью показано следующее.

1. Предсказуемость влагозапасов промерзающей почвы растет с увеличением толщины рассматриваемого слоя почвы и его глубины.
2. В почвах легкого гранулометрического состава предсказуемость влагозапасов меньше, чем в более тяжелых почвах.
3. Предсказуемость влагозапасов почвы зависит от гидравлических свойств почвы в значительно большей степени, чем от параметров вынуждающего процесса (климатических норм осадков и температуры воздуха).

#### Литература

1. Lorenz, E. N. (1963) The predictability of hydrodynamic flow. Trans. N.Y. Acad. Sci., Ser. II, 25, No. 4, 409-432.
2. Lorenz, E. N. (1975), Climatic predictability, in The Physical Basis of Climate and Climate Modelling, edited by B. Bolin et al., GARP Publ. Ser., vol. 16, pp. 132–136, World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland.

3. Дымников В.П. (2007) Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов. М., ИВМ РАН, 283 с.
4. Maurer, E.P., Lettenmaier, D.P. (2004) Potential Effects of Long-Lead Hydrologic Predictability on Missouri River Main-Stem Reservoirs. *J. Climate*, 17, 174–186.
5. Shukla, S., Sheffield, J., Wood, E. F., Lettenmaier, D. P. (2013) On the sources of global land surface hydrologic predictability. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 1987–2013.
6. Collier, C.G. (2007) Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 133: 3–23
7. Douville, H. (2010) Relative contribution of soil moisture and snow mass to seasonal climate predictability: a pilot study. *Climate Dynamics*. 34(6), 797-818
8. Schlosser, C.A., Milly, P. C. D. (2002) A Model-Based Investigation of Soil Moisture Predictability and Associated Climate Predictability. *J. Hydrometeorol*, 3, 483–501.
9. Dirmeyer, P.A., Schlosser, C.A., Brubaker, K.L. (2009) Precipitation, Recycling, and Land Memory: An Integrated Analysis. *J. Hydrometeorol*, 10, 278–288.
10. Демченко П.Ф., Кислов А.В. (2010) Стохастическая динамика природных объектов: броуновское движение и геофизические приложения. М.: ГЕОС. 189 с.
11. Blöschl, G. and Sivapalan, M. (1995) Scale issues in hydrological modelling: A review, *Hydrol. Processes*, 9, 251–290
12. Zehe, E., Elsenbeer, H., Lindenmaier, F., Schulz, K., Blöschl, G. (2007) Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research*, 43, W07434, doi:10.1029/2006WR005589.
13. Zehe, E. and Blöschl, G. (2004) Predictability of hydrologic response at the plot and catchment scales: Role of initial conditions. *Water Resources Research*, 40, W10202, doi:10.1029/2003WR002869.
14. Kumar, P. (2011) Typology of hydrologic predictability. *Water Resources Research*, 47, W00H05, doi:10.1029/2010WR009769.
15. Mahanama, S., Livneh, B., Koster, R., Lettenmaier, D., Reichle, R. 2012: Soil Moisture, Snow, and Seasonal Streamflow Forecasts in the United States. *J. Hydrometeorol*, 13, 189–203.
16. Blöschl, G. (2006) Hydrologic synthesis: Across processes, places, and scales, *Water Resources Research*, 42, W03S02, doi:10.1029/2005WR004319.

17. Report of a Workshop on Predictability & Limits-To-Prediction in Hydrologic Systems Nation. Acad. Press, Washington, D.C. 2002. 138p.

18. *Ehret, U., Gupta, H. V., Sivapalan, M., Weijis, S. V., Schymanski, S. J., Blöschl, G., Gelfan, A. N et al.* (2014) Advancing catchment hydrology to deal with predictions under change, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 649-671, doi:10.5194/hess-18-649-2014.

19. *Кляцкин В.И.* Стохастические уравнения глазами физика (Основные положения, точные результаты и асимптотические приближения). М.: Физматлит, 2001, 528 с.

20. *Фролов А.В.* Динамико-стохастические модели многолетних колебаний гидрологических процессов. М., Наука, 2007.

21. *Музылев С.В. Привальский В.Е. Раткович Д.Я.* Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982, 184 с.

22. *Кучмент Л. С., Гельфан А.Н.* Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М. Наука, 1993. 104 с.

23. *Gelfan A. N.* (2006) Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parametrization by basic soil data./ In: M. Sivapalan et al. (Eds) Predictions in Ungauged Basins: Promises and Progress. Proceedings of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguazu, Brazil, April 2005. IAHS Publ., 303, pp. 293-304.

24. *Гельфан А.Н.* Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. 294 с.

## **ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЧНОГО СТОКА ВОЛГИ И ДОНА ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ<sup>6</sup>**

Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А.,  
Вишневская И.А., Зайцева И.С., Долгов С.В.,  
Кашутина Е.А., Ясинский С.В.  
Институт географии РАН, г. Москва  
hydrology-igras@yandex.ru

**Введение.** Рассмотрены произошедшие в период инструментальных наблюдений и вероятные в будущем изменения речного стока в бассейнах рек Волги и Дона, обусловленные климатически-

---

<sup>6</sup>Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований в рамках грантов №13-05-41437, №14-05-00761 и №15-05-04207.