

Геоинформатика. 2025. № 1. С. 50–56.
Geoinformatika. 2025;(1):50–56.

Геоэкология

Научная статья
 УДК 629.5.053; 656.615
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-50-56>

Оценка георисков территориальной активности в районах со слабо коррелированными ограничивающими факторами

© 2025 г. — Евгений Петрович Истомин^{1, а)}, Иннокентий Евгеньевич Истомин^{2, б)}, Ирма Андреевна Мартын^{1, в)}, Сергей Иванович Биденко^{3, д)}

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет; Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук; Санкт-Петербург, Россия

³ АО «НПО «Импульс»; Санкт-Петербург, Россия

^{а)}biom220@bk.ru, ^{б)}kesha22ist@gmail.com, ^{в)}irma_martyn@mail.ru, ^{д)}sibidenko@mail.ru

Аннотация: В статье рассматривается один из подходов обработки и анализа данных территориальной ситуации, связанной с уровнем водной поверхности в Обской губе. Для анализа был выбран пункт Сеяха, по которому представлены геоданные за год. Эта информация использовалась в дальнейшем для анализа и построения модели и оценки георисков.

Ключевые слова: геориски; прогнозирование; математическое моделирование; случайные процессы.

Для цитирования: Истомин Е.П., Истомин И.Е., Мартын И.А., Биденко С.И. Оценка георисков территориальной активности в районах со слабо коррелированными ограничивающими факторами // Геоинформатика. — 2025. — № 1. — С. 50–56. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-50-56>.

Geoecology

Original article

Assessment of georisks of territorial activity in areas with weakly correlated limiting factors

© 2025 — Evgeny P. Istomin^{1, а)}, Innokenty E. Istomin^{2, б)}, Irma A. Martyn^{1, в)}, Sergey I. Bidenko^{3, д)}

¹Russian State Hydrometeorological University; St. Petersburg, Russia

²Ioffe Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences; St. Petersburg, Russia

³NPO Impulse JSC; St. Petersburg, Russia

^{а)}biom220@bk.ru, ^{б)}kesha22ist@gmail.com, ^{в)}irma_martyn@mail.ru, ^{д)}sibidenko@mail.ru

Abstract: The article considers one of the approaches to processing and analyzing data on the territorial situation related to the water surface level in the Gulf of Ob. For the analysis, the Seyakh point was selected, for which the geodata for the year are presented. This information was later used to analyze and build a model and estimate georisks.

Key words: georisks; forecasting; mathematical modeling; random processes.

For citation: Istomin E.P., Istomin I.E., Martyn I.A., Bidenko S.I. Assessment of georisks of territorial activity in areas with weakly correlated limiting factors. *Geoinformatika*. 2025;(1):50–56. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-50-56>. In Russ.

Введение

Район Обской губы интенсивно развивается в настоящее время вместе с Северным морским путем (СМП) (рис. 1). Здесь расположены важнейшие на СМП порты, добывающие и обрабатывающие предприятия [1].

Акватория Обской губы характеризуется сложными физико-географическими (мелководность, ледовитость, аномалии физических полей Земли, низкие температуры, сильные ветры, изменчивость рельефа дна, слабая освещенность) и хозяйственно-географическими (удаленность района, слабая гидрографическая и гидрометеорологическая изученность, недостаточная оборудованность средствами навигации, связи и телекоммуникации, освещения обстановки) условиями.

Для обеспечения безопасности навигации в стесненных акваториях, оптимальной диспетчеризации движения судов требуется прогноз изменения уровня моря или водной поверхности (далее уровень). В статьях [2, 3] описаны методики оценки георисков, основанные на априорных геоданных. Однако эти методики нельзя использовать в случае временной независимости этапов процесса изменения уровня воды.

В статье описывается модель расчета территориального фенологического риска (геориска), связанного с вероятностью выхода уровня моря за установленные безопасные для судоходства границы. Расчет георисковой вероятности осуществляется на основе статистического анализа данных уровня воды в Обской губе в точке Сеяха ((широта, долгота) = (70,2; 72,6)) — рис. 1.

Рис. 1. Космоснимок района Обской губы с отмеченным п. Сеяха

Fig. 1. Satellite image of the Ob Bay area with the marked village of Seyakha



Модель

Рассмотрим модель расчета риска, связанного с вероятностью выхода уровня воды за заданные границы. На начальном этапе необходимо получить статистику по уровню моря за сутки. Измерения уровня воды от ординара проводились 3-4 раза в сут. в течение года. Сутки разделялись (от 00:00 до 24:00 ч) на $M = 12$ частей по 2 ч ($\Delta t = 2$). Для каждого промежутка времени из набора наблюдаемых данных выбраны достоверные значения и составлена гистограмма (рис. 2).

Из гистограмм рис. 2 А и В видно, что можно выделить два пика. Из установленного натурными наблюдениями приливо-отливного режима Обской губы правый пик соответствует приливу, левый соответствует отливу. Разделим гистограммы на две составляющие следующим образом. Из данных находим, что максимальное значение уровня воды не превышает 1 м, минимальное значение уровня воды не меньше 0 м. Условимся считать, что все значения уровня воды ниже 0,5 м являются отливом, а значения выше 0,5 м — приливом. Сначала рассмотрим прилив и отлив отдельно.

Будем искать следующие статистические параметры: $\mu_{1,2}$ — математическое ожидание, $\sigma_{1,2}$ —

среднеквадратичное отклонение, $\rho_{1,2}$ — автокорреляционная функция. Индексами 1 и 2 обозначены прилив и отлив соответственно. Уравнения, которые будут использоваться для вычислений параметров, имеют следующий вид:

$$\mu_{1,2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{1,2,i}}{N},$$

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,2,i} - \mu_{1,2})^2}{N}}, \quad (1)$$

где $x_{1,2,i}$ — значения уровня воды для определенного промежутка времени; N — число измерений уровня воды для определенного промежутка времени.

Автокорреляционная функция вычисляется следующим образом:

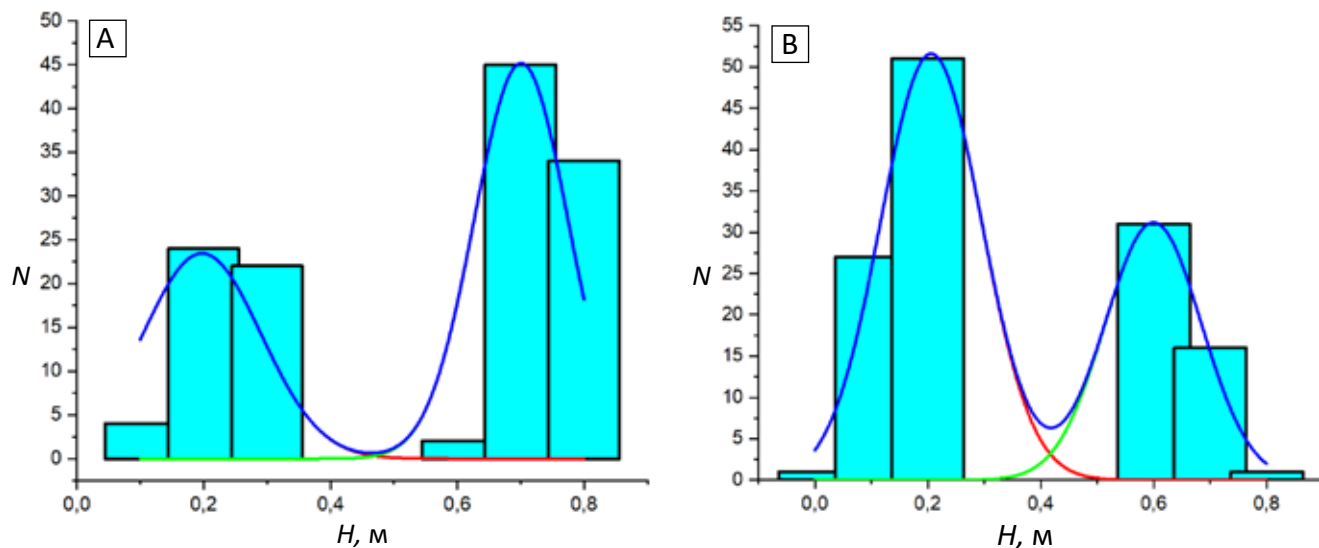
$$\rho(t_x, t_y) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{N \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (2)$$

где t_x, t_y — значение времени из одного и другого промежутка времени соответственно; x_i, y_i — значения уровня воды для одного и другого промежутка времени соответственно; N — число измерений

Рис. 2. Статистика наблюдений по уровню за сутки:

A — гистограммы уровня воды для промежутка времени [0; 2] ч; B — гистограммы уровня воды для промежутка времени [6; 8] ч. Сплошная синяя линия — ненормированное распределение, заданное как два гауссовских пика (красная и зеленая кривые). H — ординар, N — частота

Fig. 2. Daily level observation statistics: A — histograms of the water level for the time interval [0; 2] hours; B — histograms of the water level for the time interval [6; 8] hours. The solid blue line shows an irregular distribution defined as two Gaussian peaks (red and green curves). H is the ordinal (m), N is the frequency



уровня воды для определенных промежутков времени; μ_x, μ_y — среднее значение уровня воды для одного и другого промежутка времени соответственно; σ_x, σ_y — среднеквадратичное отклонение уровня воды для одного и другого промежутка времени соответственно.

На рис. 3 отображены временные статистические характеристики прилива.

На рис. 3 А изображено среднее значение прилива и отлива в зависимости от времени. Видно, что среднее значение прилива больше, чем среднее значение отлива. На рис. 3 В приведено среднеквадратичное отклонение прилива и отлива в зависимости от времени. Видно, что среднеквадратичное отклонение прилива и отлива практически одинаковое.

На рис. 3 С изображена автокорреляционная функция $\rho(t_0, t)$ (t_0 — начальный момент времени, t — данный момент времени) прилива и отлива в зависимости от времени. Видно, что автокорреляционная функция отлива при $t \geq 2$ ч близка к нулевому значению, автокорреляционная функция прилива при $t \geq 2$ ч по модулю не превышает значения 0,1. Можно сделать вывод, что уровень в данный момент времени почти не влияет на уровень в последующий момент времени.

Рассмотрим теперь уровень для случаев прилива и отлива совместно. На рис. 2 А, В изображены гистограммы уровня воды для разных промежутков времени. Сплошными линиями показано ненормированное распределение, заданное как два гауссовских пика:

$$g(x) = A_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right) + A_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right), \quad (3)$$

где A_1 и A_2 — коэффициенты подгона для пика 1 и 2 соответственно; σ_1 и σ_2 — среднеквадратичное отклонение для пика 1 и 2 соответственно; μ_1 и μ_2 — математическое ожидание для пика 1 и 2 соответственно.

Нормированное распределение будет иметь вид

$$f(x) = B_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_1}{\sigma_1}\right)^2\right) + B_2 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right), \quad (4)$$

где $B_1 = \frac{A_1}{A_1 + A_2}$, $B_2 = \frac{A_2}{A_1 + A_2}$. $\frac{B_1}{\sigma_1}$ и $\frac{B_2}{\sigma_2}$ определяют значение в максимуме пика прилива и отлива соответственно.

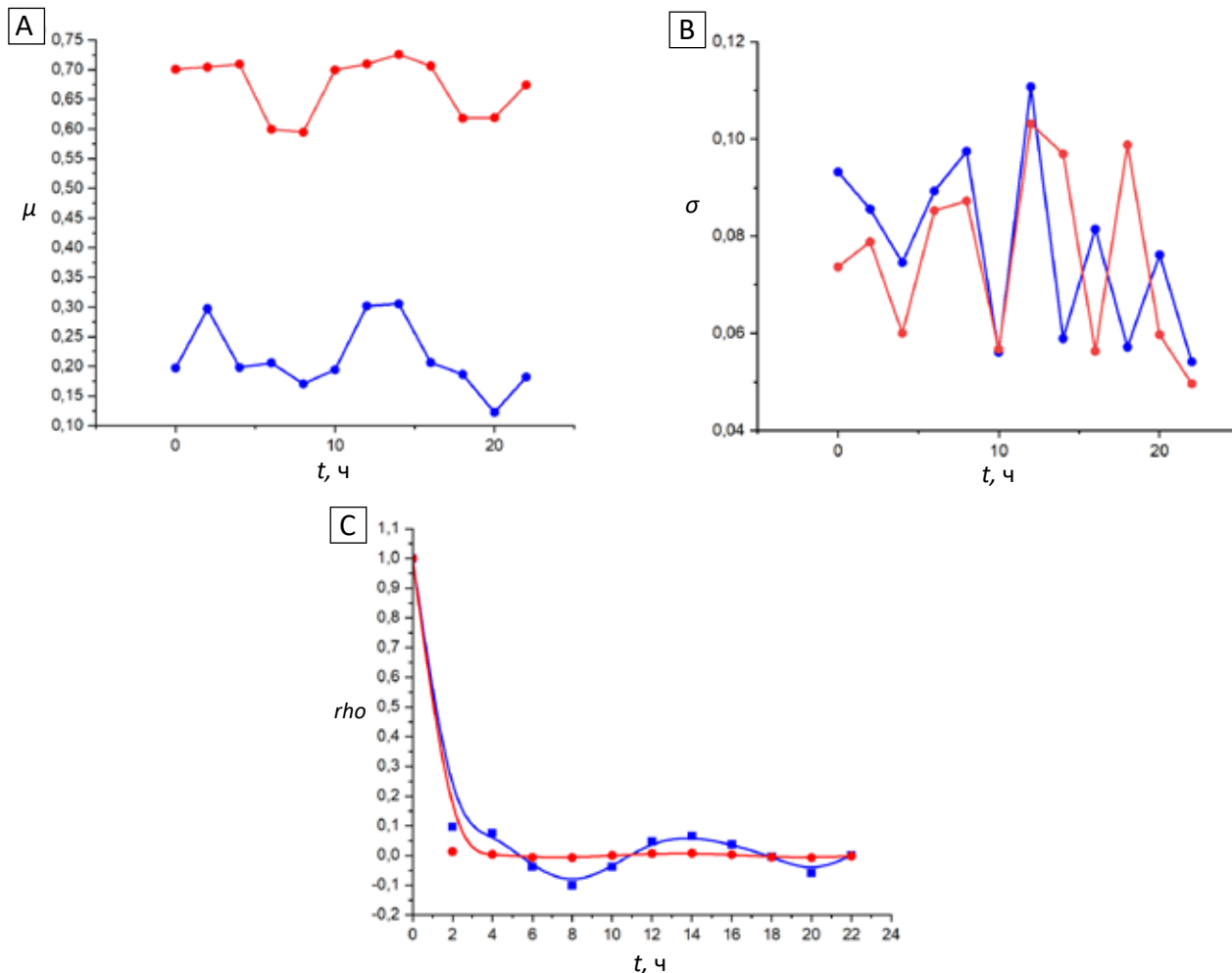
В таблице даны рассчитанные значения коэффициентов B_1 и B_2 для разных промежутков времени для уравнения (4).

На рис. 4 А представлена зависимость коэффициента B_1 от коэффициента B_2 и посчитан коэффициент корреляции по формуле

Рис. 3. Временные статистические характеристики прилива.

А — среднее значение прилива и отлива в зависимости от времени; В — среднеквадратичное отклонение прилива и отлива в зависимости от времени; С — автокорреляционная функция $\rho(t_0, t)$ прилива и отлива в зависимости от времени. Красные кривые — прилив, синие — отлив

Fig. 3. A — the average value of high tide and low tide depending on time; B — the standard deviation of high and low tide depending on time; C — the autocorrelation function of high and low tide depending on time. Red curves – high tide, blue curves – low tide



Таблица

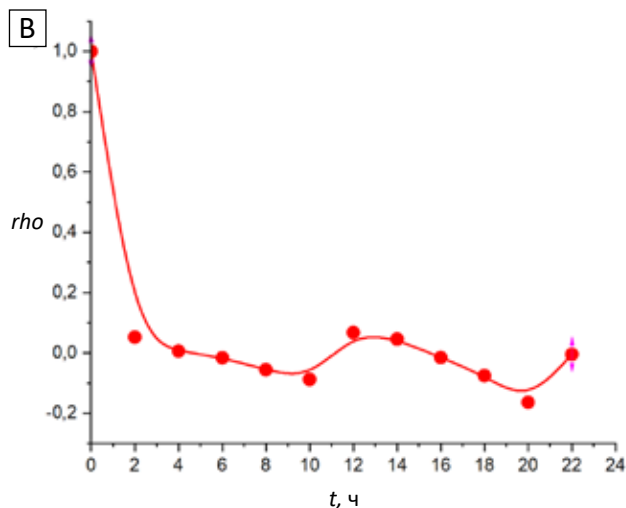
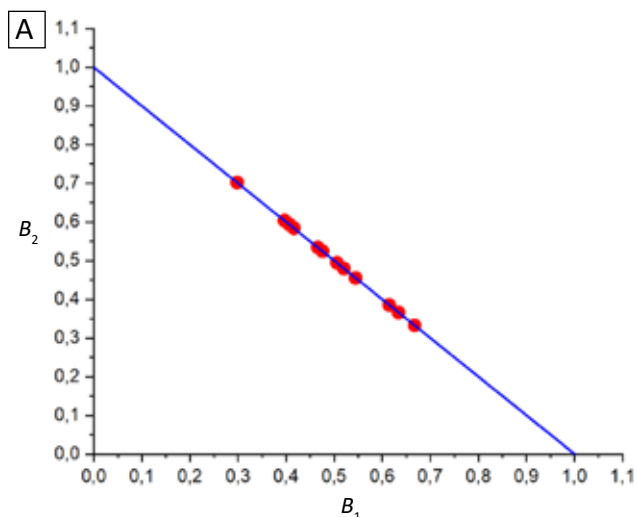
Table

t, ч	μ_1 , М	σ_1 , М	μ_2 , М	σ_2 , М	B_1	B_2	μ , М	σ , М
0; 2	0,1973	0,1865	0,7007	0,1474	0,397	0,603	0,50085	0,295929
2; 4	0,2969	0,1712	0,7043	0,1577	0,407	0,593	0,538488	0,25833
4; 6	0,1983	0,1492	0,7091	0,1201	0,476	0,524	0,465959	0,288502
6; 8	0,2058	0,1786	0,5993	0,1706	0,634	0,366	0,349821	0,258468
8; 10	0,1707	0,1949	0,5947	0,1745	0,615	0,385	0,33394	0,27866
10; 12	0,1942	0,1122	0,6995	0,1135	0,52	0,479	0,436045	0,27625
12; 14	0,3016	0,2215	0,7095	0,2063	0,416	0,584	0,539814	0,292722
14; 16	0,3052	0,1179	0,7258	0,1939	0,298	0,702	0,600461	0,259891
16; 18	0,2063	0,1629	0,7062	0,1127	0,466	0,534	0,473247	0,285192
18; 20	0,1865	0,1144	0,6183	0,1976	0,506	0,494	0,399809	0,26929
20; 22	0,1222	0,1523	0,6193	0,1195	0,667	0,333	0,287734	0,274066
22; 24	0,1821	0,1083	0,6744	0,0993	0,545	0,455	0,406097	0,266417

Рис. 4. Корреляционные характеристики параметров распрямлений:

А — зависимость коэффициента B_1 от коэффициента B_2 , коэффициент линейной корреляции $\rho = -0,9999999999999999$; В — коэффициент автокорреляции $\rho(t, t)$. Сплошной линией показана экстраполяция В-сплайном

Fig. 4. Correlation characteristics of the straightening parameters: A — dependence of coefficient B_1 on coefficient B_2 , linear correlation coefficient $\rho = -0,9999999999999999$; B — the autocorrelation coefficient, the solid line shows the extrapolation of the B-spline



$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (B_{1i} - \mu_{B_1})(B_{2i} - \mu_{B_2})}{n \cdot \sigma_{B_1} \cdot \sigma_{B_2}},$$

где $\mu_{B_1}, \mu_{B_2}, \sigma_{B_1}, \sigma_{B_2}$ рассчитаны по формуле (1).

Коэффициент линейной корреляции $\rho = -0,9999999999999999$, что свидетельствует о прямой линейной зависимости B_1 от B_2 . Эта зависимость на рис. 4 А представлена сплошной прямой, и уравнение имеет следующий вид:

$$B_1 + B_2 = 1. \tag{5}$$

На рис. 4 В представлены результаты расчета коэффициента автокорреляции $\rho(t, t)$ по формуле (2). Здесь сплошной линией показана экстраполяция В-сплайном. На рисунке видно, что автокорреляционная функция при $t \geq 2,5$ ч по модулю не превышает значения 0,1. Это свидетельствует о том, что уровень воды в данный момент времени почти не влияет на уровень в последующий момент времени, поэтому нет возможности использовать модель, описанную в статьях [2, 3].

Опишем другую модель, которой можно будет пользоваться для расчета риска в данном случае.

Выявим, есть ли зависимость уровня воды от времени. Для этого нужно определить стационарность или нестационарность математического ожидания и дисперсии. Проверим равенство средних значений и дисперсий между значениями, которые соответствуют разным промежуткам времени i и j . Воспользуемся для выяснения равенства средних значений T -критерием Стьюдента [4], который имеет вид:

$$T_{ij} = (\mu_i - \mu_j) \cdot \left(\frac{\sigma_i^2}{N_i - 1} + \frac{\sigma_j^2}{N_j - 1} \right)^{-\frac{1}{2}}. \tag{6}$$

Воспользуемся для выяснения равенства дисперсий значений F -критерием Фишера [4], который имеет вид

$$F_{ij} = \frac{\sigma_i^2}{\sigma_j^2}. \tag{7}$$

Введем индикаторную функцию

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } |T_{ij}| < t_{N_i+N_j-2} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \text{ и } F_{N_i-1; N_j-1} \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) < F_{ij} < F_{N_i-1; N_j-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right), \\ 0, & \text{остальные случаи} \end{cases} \tag{8}$$

где $t_{N_i+N_j-2} \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ — квантиль уровня $\left(\frac{\alpha}{2} \right)$ распределения Стьюдента; $F_{N_i-1; N_j-1} \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ — квантиль уровня $\left(\frac{\alpha}{2} \right)$ распределения Фишера. Коэффициент стационарности W определяется как [4]

$$W = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M p_{ij}. \tag{9}$$

Среднее значение можно найти, используя формулу

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx. \tag{10}$$

Дисперсию значение можно найти, используя формулу

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 \cdot f(x) dx - \mu^2. \tag{11}$$

Подставив в формулу (10) и (11) формулу (4) и учитывая (5), получим следующий вид математического ожидания и дисперсии соответственно:

$$\begin{aligned} \mu &= B_1 \cdot \mu_1 + B_2 \cdot \mu_2, \\ \sigma^2 &= B_1 \cdot \sigma_1^2 + B_2 \cdot \sigma_2^2 + B_1 \cdot B_2 \cdot (\mu_1 - \mu_2)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Можно посчитать математическое ожидание и дисперсию для общего уровня водной поверхности, имея дисперсию и математическое ожидание прилива и отлива. Результаты расчета μ и σ по выражению (12) представлены в таблице.

Рассмотрим сначала стационарность прилива и отлива отдельно. Используя формулу (9) и значения параметров из таблицы и взяв доверительный интервал, равный 0,9, найдем, что коэффициент стационарности для прилива и отлива равен соответственно: $W_1 = 0,91$, $W_2 = 0,95$. Если рассматривать процессы прилива и отлива по отдельности, то эти процессы стационарны. Теперь рассмотрим стационарность совместного процесса прилива и отлива. Также используя формулу (9), находим, что коэффициент стационарности равен: $W = 0,63$. Из чего делаем вывод, что данный процесс не стационарен. Для дальнейших вычислений параметры μ_1 , μ_2 , σ_1 , σ_2 можно считать как средние значения, взятые из таблицы, тогда $\mu_1 = 0,213925$, $\mu_2 = 0,671758$, $\sigma_1 = 0,077913$, $\sigma_2 = 0,075546$.

Также интересно будет найти риск (вероятность) того, что уровень воды выйдет за границы заданного промежутка $[h_l, h_u]$ в заданный момент времени, т. е. найти вероятность, что уровень не будет принимать значения в заданном промежутке. Для данной задачи воспользуемся формулой

$$P = 1 - \int_{h_l}^{h_u} f(x) dx. \quad (13)$$

Подставим уравнение (4) в уравнение (13) и получим

$$\begin{aligned} P = 1 - \frac{1}{2} \left[B_1 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{h_u - \mu_1}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{h_l - \mu_1}{\sqrt{2} \cdot \sigma_1} \right) \right] + \right. \\ \left. + B_2 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{h_u - \mu_2}{\sqrt{2} \cdot \sigma_2} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{h_l - \mu_2}{\sqrt{2} \cdot \sigma_2} \right) \right] \right], \end{aligned} \quad (14)$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x \exp(-s^2) ds$ — функция ошибок.

На рис. 5 изображена зависимость P от времени t для промежутка $[0,6; +\infty]$.

Также будет целесообразно найти вероятное время выхода уровня воды за границы заданного промежутка $[h_l, h_u]$:

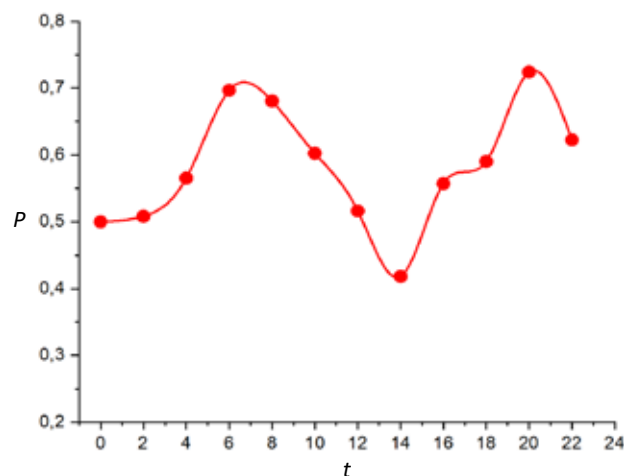
$$T_{\text{вых}} = \int_0^{t_f} P(t) dt. \quad (15)$$

Список источников

1. Панамарев Г.Е., Биденко С.И. Геоинформационная поддержка управления сложными территориальными объектами и системами. – Новороссийск: МГА, 2011. – 202 с.

Рис. 5. Зависимость риска выхода уровня воды за границы промежутка $[0,6; +\infty]$ от времени t

Fig. 5. Dependence of the risk of the water level going beyond the boundaries of the interval $[0,6; +\infty]$ on time t



Для заданного промежутка высот $[0,6; +\infty]$ вероятное время выхода уровня воды $T_{\text{вых}} = 11,42$ ч.

Выводы

Прилив и отлив оказываются стационарными процессами при отдельном их рассмотрении, однако при совместном рассмотрении прилива и отлива процесс изменения уровня моря оказывается нестационарным. Определить риск (вероятность) выхода уровня воды за определенные границы можно, используя формулу (14). При этом риск не будет зависеть от уровня в начальный момент времени, т. е. от начальных условий, а будет зависеть только от заданного момента времени. Прилив и отлив оказываются стационарными процессами при отдельном их рассмотрении, однако при совместном рассмотрении прилива и отлива процесс оказывается нестационарным, что дает возможность провести расчет риска.

Найти вероятное время выхода уровня воды за границы заданного промежутка можно по формуле (15). Этот параметр показывает, как долго уровень находится в заданном промежутке.

На примере Морского канала Обской губы показано, что расчет риска выхода уровня воды за определенные границы обеспечивает повышение навигационной безопасности, способствует оптимизации процедур диспетчеризации судоходства в стесненных акваториях.

Дальнейшие направления исследования представляются на путях увеличения количества учитываемых в модели факторов геосреды.

2. *Истомин Е.П., Петров Я.А., Истомин И.Е.* Методика оценки георисков на основе управляемых параметров // *ИнфоГео-2018. Стратегическое управление развитием территорий : сборник трудов V международной научно-практической конференции.* – Т. 1. – СПб. : РГГМУ, 2018 – С. 208–215.
3. *Истомин Е.П., Истомин И.Е.* Приближенная модель прогнозирования георисков // *Информация и космос.* – 2024. – № 3. – С. 117–121.
4. *Шелухин О.И., Осин А.В., Невструев И.А., Урьев Г.А.* Сравнительный анализ методов оценки стационарности самоподобных процессов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* – 2006. – Т. 2. – № 1. – С. 55–60.

References

1. *Panamarev G.E., Bidenko S.I.* Geoinformatsionnaya podderzhka upravleniya slozhnymi territorial'nymi ob'ektami i sistemami [Geoinformation support for managing complex territorial objects and systems]. Novorossiisk: MGA; 2011. 202 p.
2. *Istomin E.P., Petrov Ya.A., Istomin I.E.* Methodology for the estimation of georisk on the basis of controlled parameters. In: *InfoGeo-2018. Strategicheskoe upravlenie razvitiem territorii : sbornik trudov V mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii.* Vol. 1. St.Petersburg: RGGMU; 2018. pp. 208–215.
3. *Istomin E.P., Istomin I.E.* An approximate model for predicting georisks. *Information and space.* 2024;(3):117–121.
4. *Sheluhin O.I., Osin A.V., Nevstruev I.A., Urev G.A.* Comparative study of the evaluation techniques for self-similar processes stationarity. *Elekhtrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy.* 2006;2(1):55–60.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024 г., одобрена после рецензирования 09.10.2024 г., принята к публикации 11.10.2025 г.
The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 09.10.2024; accepted for publication 11.10.2025.

Информация об авторах

Истомин Евгений Петрович

Доктор технических наук, профессор, директор института Информационных систем и геотехнологий
ФГБОУ ВО «РГГМУ»
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79
e-mail: biom220@bk.ru
ORCID: 0000-0001-6247-4373
SPIN-код: 6404-9070
AuthorID: 333123
Scopus ID: 56951051300

Истомин Иннокентий Евгеньевич

Аспирант
ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26
e-mail: keshha22ist@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4242-5958
ResearcherID: AEZ-3868-2022
Scopus ID: 57222183477
SPIN-код: 1757-5779

Мартын Ирма Андреевна

Кандидат технических наук
Доцент кафедры Прикладной информатики
ФГБОУ ВО «РГГМУ»
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79
e-mail: irma_martyn@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4332-7308

Биденко Сергей Иванович

Профессор, доктор технических наук
Главный эксперт
Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Импульс»
195299 Санкт-Петербург, ул. Киришская, д. 2а
e-mail: sibidenko@mail.ru
SPIN-код: 1886-0981

Information about authors

Evgeny P. Istomin

Professor, Doctor of Technical Sciences
Director of the Institute of Information Systems and Geotechnologies
Russian State Hydrometeorological University
79, Voronezhskaya str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: biom220@bk.ru
ORCID: 0000-0001-6247-4373
SPIN-код: 6404-9070
AuthorID: 333123
Scopus ID: 56951051300

Innokenty E. Istomin

Postgraduate student
Ioffe Institute of Physics and Technology of the Russian Academy of Sciences
26, Politekhnicheskaya str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: keshha22ist@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4242-5958
ResearcherID: AEZ-3868-2022
Scopus ID: 57222183477
SPIN-код: 1757-5779

Irma A. Martyn

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor
Russian State Hydrometeorological University
79, Voronezhskaya str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: irma_martyn@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4332-7308

Sergey I. Bidenko

Professor, Doctor of Technical Sciences
NPO Impulse JSC
2a, Kirishskaya str., St. Petersburg, 195299, Russia
e-mail: sibidenko@mail.ru
SPIN-код: 1886-0981